

RAFAEL TOSHIO INOUE

**IMPACTO DA ASSIMILAÇÃO DE DADOS
OBSERVACIONAIS NO PROGNÓSTICO DE TEMPO COM
O MODELO WRF**

CURITIBA

2014

RAFAEL TOSHIO INOUE

**IMPACTO DA ASSIMILAÇÃO DE DADOS
OBSERVACIONAIS NO PROGNÓSTICO DE TEMPO COM
O MODELO WRF**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Área de Concentração em Mecânica Computacional, do Departamento de Matemática, Setor de Ciências Exatas e do Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Métodos Numéricos em Engenharia

Orientador: MAURÍCIO FELGA GOBBI

Co-Orientador: LEONARDO CALVETTI

CURITIBA

2014

I58i

Inouye, Rafael Toshio

Impacto da assimilação de dados observacionais no prognóstico de tempo com o modelo WRF / Rafael Toshio Inouye. – Curitiba, 2014. 99f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, 2014.

Orientador: Maurício Felga Gobbi -- Coorientador: Leonardo Calvetti. Bibliografia: p. 96-99.

1. Distribuição (Teoria da probabilidade). 2. Radar. 3. Previsão numérica do tempo (Meteorologia). I. Universidade Federal do Paraná. II. Gobbi, Maurício Felga. III. Calvetti, Leonardo. IV. Título.

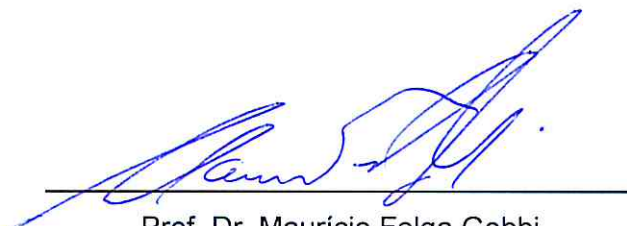
CDD: 551.634

TERMO DE APROVAÇÃO

RAFAEL TOSHIO INOUE

IMPACTO DA ASSIMILAÇÃO DE DADOS OBSERVACIONAIS NO PROGNÓSTICO DE TEMPO COM O MODELO WRF

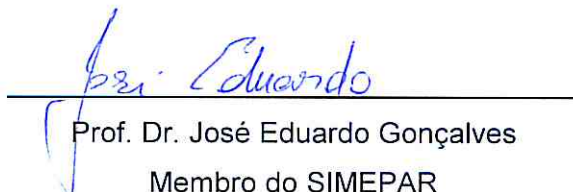
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de mestre no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. Mauricio Felga Gobbi
Orientador - Membro do PPGMNE/UFPR.



Prof. Dr. Dirceu Luis Herdies
Membro do CPTEC/INPE



Prof. Dr. José Eduardo Gonçalves
Membro do SIMEPAR

Curitiba, 23 de outubro 2014

Dedicatória

Para Ana, Cecília e Maria, mulheres da minha vida.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Maurício Felga Gobbi por ter me aceitado como orientando sem ao menos me conhecer. Sou grato também ao meu co-orientador, Dr. Leonardo Calveti, por todo conhecimento passado, mas acima de tudo por ter me conduzido com paciência e amizade.

A todos que de alguma forma contribuíram para a execução desse trabalho.

Epígrafe

— Estradas? Para onde vamos não precisamos de estradas.

Emmet Brown, em “De Volta para o Futuro”

Resumo

Fenômenos meteorológicos severos, tais como linhas de instabilidade e convecções com forçantes dinâmicas, causam muitos prejuízos socioeconômicos, por isso o conhecimento desses eventos são relevantes para prever desastres a tempo de minimizar seus impactos. Os modelos numéricos de previsão de tempo de mesoescala são inicializados a partir de condições iniciais e de contorno de um modelo global. Dados locais como dados de radar e de estações meteorológicas são inseridos nos modelos numéricos por meio de um complexo processo de assimilação de dados. O pacote Weather Research and Forecasting model Data Assimilation system (WRFDA) é capaz de assimilar diversas fontes de dados observacionais permitindo a utilização de informações locais para a simulação de eventos de difícil previsão. Quatro estudos de casos foram feitos a fim de avaliar duas metodologias de assimilação de dados locais com o uso do sistema WRFDA. Os prognósticos de tempo em mesoescala (fenômenos na ordem de centenas de quilômetros) foram obtidos com o modelo numérico WRF em resolução de 3km. A assimilação influenciou o modelo nas primeiras 3h de modelagem, melhorando a simulação de fenômenos convectivos quando o mesmo era detectado nas imagens de Radar. O baixo custo computacional torna sua implementação operacional viável.

Palavras-chave: Assimilação, Assimilação de dados, RADAR, WRFDA, WRF, Previsão de curto prazo.

Abstract

Severe weather phenomena such as squall lines and deep convection with dynamic forcings causes many socioeconomic damages, so the knowledge of these events are relevant to predict disasters in time to minimize their impacts. Mesoscale atmospheric numerical models are initialized from initial and boundary conditions from a global model. Local data such as radar data and weather stations are assimilated in numerical models through a complex process of data assimilation. The Weather Research and Forecasting model Data Assimilation System (WRFDA) package is capable of assimilating diverse sources of observational data allowing the use of local information for the simulation of events that are difficult to forecast. Four case studies were performed to assess two methodologies of local data assimilation using the WRF system. Mesoscale forecasts (order of hundreds of kilometers) was performed with the WRF numerical model in high resolution (model grid less or equal to 3km). The first 3 hours of forecast were affected by the assimilation, improving the simulation of convective phenomena specially when it was detected by Radar. The low computational cost makes its implementation feasible.

Palavras-chave: Assimilation, Data Assimilation, RADAR, WRFDA, WRF, Short Term Forecast.

Lista de Figuras

- Figura 1.1 Representação esquemática da perda de informação ao longo das horas de previsão. A linha solida representa o limite teórico de previsão. A linha tracejada representa os modelos numéricos de previsão do tempo e a pontilhada os métodos de nowcasting. Adaptado de (GOLDING, 1998) 24
- Figura 2.1 Esquema de quatro estratégias para assimilação de dados em função do tempo. A forma como a distribuição temporal das observações é processada para produzir a sequência de estados assimilados (curva inferior em cada quadro) pode ser sequencial ou contínua. Adaptado de (NCAR, 2013) 29
- Figura 2.2 Esquema da análise de Cressman para uma variável. Adaptado de (WARNER, 2011) 30
- Figura 2.3 Raio de influência das observações (círculo grande), pontos de grade do modelo (círculos pequenos) e observações (quadrados) em torno de um ponto de grade (círculo preto). (KALNAY, 2003) 31
- Figura 2.4 Esquema mostrando como as duas funções custo, J_o e J_b , são combinadas para obter um valor mínimo no erro da análise. Adaptado de (WARNER, 2011). 33
- Figura 3.1 Representação do domínio utilizado na modelagem numérica. Malhas 1, 2 e 3 com 27km, 9km e 3km de resolução horizontal respectivamente. Os círculos representam as áreas de varredura do radar nas tarefas de 200Km(círculo menor) e 240Km(círculo maior). A letra X indica o centro

	do radar	41
Figura 3.2	Distribuição dos 50 níveis verticais do modelo. O nível mais baixo é a pressão em superfície e o topo é definido como 40hPa.	42
Figura 3.3	Estações meteorológicas automáticas operadas e mantidas pelo SIMEPAR.	44
Figura 3.4	Exemplo de <i>record</i> com dados de estações meteorológicas. Cabeçalho em vermelho, dados medidos em preto negrito e código para fim do <i>record</i> em verde.	44
Figura 3.5	Exemplo de arquivo com dados do radar para a entrada do WRFDA com dois <i>records</i> . Cabeçalho em vermelho, e em verde os cabeçalhos e rodapés dos <i>records</i>	47
Figura 3.6	Esquema da relação entre os dados (círculos) e os algoritmos (quadrados) do sistema. A cor branca representa os elementos que compõem o pacote WRFDA, as cinzas o modelo e as azuis os elementos externos aos dois. O termos em vermelho são os correspondentes à função custo. Os elementos ligados por linha pontilhada são arquivos de configurações.	49
Figura 3.7	Comparação esquemática entre previsão e radar. Adaptado de (ROBERTS, 2008)	50
Figura 4.1	Pressão ao Nível Médio do Mar e CAPE acima de 1000 [J/kg] para o dia 31-Out-2012 às 18h00UTC. Campo extraído do modelo GFS.	52
Figura 4.2	Canal vapor d'água medido pelo satélite GOES-12 para as 18h00UTC (esquerda) e 19h30UTC (direita) do dia 31-Out-2012. Fonte: CPTEC/INPE	53
Figura 4.3	Comparação entre máxima refletividade do radar com a previsão nos	

	diferentes esquemas de assimilação entre as 18h00UTC e 19h30UTC do dia 31/10/2012. Primeira coluna: dados observados pelo radar de Teixeira Soares. Segunda coluna: previsão de controle sem assimilação de dados. Terceira coluna: previsão com o primeiro esquema de assimilação sem restrições nos dados. Quarta coluna: previsão com assimilação, mais restrito aos erros e com raio de influência menor.	54
Figura 4.4	Índice FSS (esquerda) e RMSE (direita), calculados para 6h de previsão do dia 31-Out-2012. Curva vermelha sem assimilação de dados, verde representa primeiro esquema de assimilação e azul o segundo esquema de assimilação.	55
Figura 4.5	Comparação entre o esquema com maior FSS e o TITAN para o dia 31-Out-2012 às 19:30UTC. Núcleos acima de 35dBz. Em verde os medidos pelo radar, em vermelho o previsto pelo modelo no esquema DAv2 e em azul o nowcasting feito com o TITAN.	55
Figura 4.6	Estimativa de precipitação por radar (preenchido) e previsto pelo modelo (contornos) para o dia 31-Out-2012 às 19:30UTC.	56
Figura 4.7	Razão de mistura de vapor d'água no nível mais próximo à superfície [kg/kg]. Linha vermelha indica a posição do plano meridional e a linha azul o plano zonal. O cruzamento dos planos se dá no ponto: <i>latitude</i> = -25.48 e <i>longitude</i> = -50.2	57
Figura 4.8	Perfil vertical meridional da razão de mistura do vapor d'água [kg/kg] correspondente à linha vermelha da figura 4.7. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal.	58
Figura 4.9	Perfil vertical zonal da razão de mistura do vapor d'água [kg/kg] correspondente à linha azul da figura 4.7. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional.	59

- Figura 4.10 Razão de mistura de água de chuva no nível mais próximo à superfície [kg/kg]. Linha vermelha indica a posição do plano meridional e a linha azul o plano zonal. O cruzamento dos planos se dá no ponto: *latitude* = -25.48 e *longitude* = -50.2 60
- Figura 4.11 Perfil vertical meridional da razão de mistura água de chuva [kg/kg] correspondente à linha vermelha da figura 4.10. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal. 61
- Figura 4.12 Perfil vertical zonal da razão de mistura água de chuva [kg/kg] correspondente à linha azul da figura 4.10. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional. 62
- Figura 4.13 Perfil vertical meridional da velocidade vertical [m/s] correspondente à linha vermelha da figura 4.10. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal. 63
- Figura 4.14 Perfil vertical zonal da razão da velocidade vertical [m/s] correspondente à linha azul da figura 4.10. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional. 64
- Figura 4.15 Pressão ao Nível Médio do Mar e CAPE acima de 1000 [J/kg] para o dia 21-Dez-2012 às 18h00UTC. Campo extraído do modelo GFS. 65
- Figura 4.16 Canal 4 do infravermelho pelo satélite GOES-13 para as 18h00UTC (esquerda) e 23h00UTC (direita) do dia 21-Dez-2012. Fonte: CPTEC/INPE 66
- Figura 4.17 Comparação entre máxima refletividade do radar com a previsão nos diferentes esquemas de assimilação entre as 18h00UTC e 23h00UTC do dia 21/12/2012. Primeira coluna: dados observados pelo Radar de Teixeira Soares. Segunda coluna: previsão de controle sem assimilação de dados. Terceira coluna: previsão com o primeiro esquema de assimilação

sem restrições nos dados. Quarta coluna: previsão com assimilação, mais restrito aos erros e com raio de influência menor.	67
Figura 4.18 Índice FSS (esquerda) e RMSE (direita), calculados para 6h de previsão do dia 21-Dez-2012. Curva vermelha sem assimilação de dados, verde representa primeiro esquema de assimilação e azul o segundo esquema de assimilação.	68
Figura 4.19 Comparação entre o esquema com maior FSS e o TITAN para o dia 21-Dez-2012 às 19:30UTC. Em verde os núcleos medidos pelo Radar, em vermelho o previsto pelo modelo no esquema DAv1 e em azul o nowcasting feito com o TITAN.	69
Figura 4.20 Estimativa de precipitação por Radar (preenchido) e previsto pelo modelo (contornos) para o dia 21-Out-2012 às 19:30UTC.	69
Figura 4.21 Razão de mistura de vapor d'água no nível mais próximo à superfície [Kg/Kg]. Linha vermelha indica a posição do plano meridional e a linha azul o plano zonal. O cruzamento dos planos se dá no ponto: $latitude = -25.41$ e $longitude = -49.25$	70
Figura 4.22 Perfil vertical meridional da razão de mistura do vapor d'água [kg/kg] correspondente à linha vermelha da Figura 4.21. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal.	71
Figura 4.23 Perfil vertical zonal da razão de mistura do vapor d'água [kg/kg] correspondente à linha azul da Figura 4.21. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional.	72
Figura 4.24 Razão de mistura de água de chuva no nível mais próximo à superfície [Kg/Kg]. Linha vermelha indica a posição do plano meridional e a linha azul o plano zonal. O cruzamento dos planos se dá no ponto: $latitude = -25.41$ e $longitude = -49.25$	73

Figura 4.25	Perfil vertical meridional da razão de mistura de água de chuva [kg/kg] correspondente à linha vermelha da Figura 4.24. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal.	74
Figura 4.26	Perfil vertical zonal da razão de mistura de água de chuva [kg/kg] correspondente à linha azul da Figura 4.24. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional.	75
Figura 4.27	Pressão ao Nível Médio do Mar [hPa] e Temperatura a 2m [°C] para o dia 20-Jun-2013 às 12h00UTC. Campo extraído do modelo GFS.	76
Figura 4.28	Canal 4 do infravermelho pelo satélite GOES-12 para as 12h00UTC (esquerda) e 18h00UTC (direita) do dia 20-Jun-2013. Fonte: CPTEC/INPE	77
Figura 4.29	Comparação entre máxima refletividade do radar com a previsão nos diferentes esquemas de assimilação entre as 12h30UTC e 17h30UTC do dia 20/06/2013. Primeira coluna: dados observados pelo Radar de Teixeira Soares. Segunda coluna: previsão de controle sem assimilação de dados. Terceira coluna: previsão com o primeiro esquema de assimilação sem restrições nos dados. Quarta coluna: previsão com assimilação, mais restrito aos erros e com raio de influência menor.	78
Figura 4.30	Índice FSS (esquerda) e RMSE (direita), calculados para 6h de previsão do dia 20-Jun-2013. Curva vermelha sem assimilação de dados, verde representa primeiro esquema de assimilação e azul o segundo esquema de assimilação.	79
Figura 4.31	Comparação entre o FSS e o TITAN para o dia 20-Jun-2013 às 12:30UTC. Em verde os núcleos medidos pelo Radar, em azul o nowcasting feito com o TITAN, em vermelho o previsto pelo modelo. Na esquerda o primeiro esquema de assimilação e na direita o segundo esquema.	79

Figura 4.32	Razão de mistura de água de chuva no nível mais próximo à superfície [Kg/Kg]. Linha vermelha indica a posição do plano meridional e a linha azul o plano zonal. O cruzamento dos planos se dá no ponto: <i>latitude</i> = -25.33 e <i>longitude</i> = -50.36	80
Figura 4.33	Perfil vertical meridional da razão de mistura de água de chuva [kg/kg] correspondente à linha vermelha da Figura 4.32. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal.	81
Figura 4.34	Perfil vertical zonal da razão de mistura de água de chuva [kg/kg] correspondente à linha azul da Figura 4.32. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional.	82
Figura 4.35	Perfil da velocidade vertical [m/s] correspondente à linha vermelha da Figura 4.32. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal.	83
Figura 4.36	Perfil da velocidade vertical [m/s] correspondente à linha azul da Figura 4.32. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional.	84
Figura 4.37	Pressão ao Nível Médio do Mar [hPa] e Temperatura a 2m [$^{\circ}C$] para o dia 22-Jul-2013 às 12h00UTC. Campo extraído do modelo GFS.	85
Figura 4.38	Canal 4 do infravermelho pelo satélite GOES-13 para as 00h00UTC (esquerda) e 03h30UTC (direita) do dia 20-Jun-2013. Fonte: CPTEC/INPE	86
Figura 4.39	Índice FSS (esquerda) e RMSE (direita), calculados para 6h de previsão do dia 22-Jul-2013. Curva vermelha sem assimilação de dados, verde representa primeiro esquema de assimilação e azul o segundo esquema de assimilação.	87

- Figura 4.40 Comparação entre máxima refletividade do radar com a previsão nos diferentes esquemas de assimilação entre as 00h30UTC e 05h30UTC do dia 22/07/2013. Primeira coluna: dados observados pelo Radar de Teixeira Soares. Segunda coluna: previsão de controle sem assimilação de dados. Terceira coluna: previsão com o primeiro esquema de assimilação sem restrições nos dados. Quarta coluna: previsão com assimilação, mais restrito aos erros e com raio de influência menor. 88
- Figura 4.41 Razão de mistura de vapor d'água no nível mais próximo à superfície [kg/kg]. Linha vermelha indica a posição do plano meridional e a linha azul o plano zonal. O cruzamento dos planos se dá no ponto: *latitude* = -25.48 e *longitude* = -50.2 89
- Figura 4.42 Perfil vertical meridional da razão de mistura do vapor d'água [kg/kg] correspondente à linha vermelha da figura 4.41. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal. 90
- Figura 4.43 Perfil vertical zonal da razão de mistura do vapor d'água [kg/kg] correspondente à linha azul da figura 4.41. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional. 91
- Figura 4.44 Razão de mistura de água de chuva no nível mais próximo à superfície [kg/kg]. Linha vermelha indica a posição do plano meridional e a linha azul o plano zonal. O cruzamento dos planos se dá no ponto: *latitude* = -25.48 e *longitude* = -50.2 92
- Figura 4.45 Perfil vertical meridional da razão de mistura água de chuva [kg/kg] correspondente à linha vermelha da figura 4.44. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal. 93
- Figura 4.46 Perfil vertical zonal da razão de mistura água de chuva [kg/kg] correspondente à linha azul da figura 4.44. Linha tracejada indica a posição

do cruzamento com o plano meridional.	94
--	----

Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Principais parametrizações utilizadas no modelo numérico WRF versão 3.5.	41
Tabela 3.2	Características Técnicas do Radar DWSR-95S do SIMEPAR. Fonte: Saraiva (2006).	46
Tabela 3.3	Simulações numéricas realizadas	48
Tabela 4.1	Dados assimilados por variável para o dia 31-Out-2012	53
Tabela 4.2	Dados assimilados por variável para o dia 21-Dez-2012	66
Tabela 4.3	Dados assimilados por variável para o dia 20-Jun-2013	77
Tabela 4.4	Dados assimilados por variável para o dia 22-Jul-2013	86

Lista de Siglas

PNT	Previsão Numérica do Tempo
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
GWE	Global Weather Experiment
WRF	Weather Research Forecast
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ESRL	Earth System Research Laboratory
AFWA	Air Force Weather Agency
NRL	Naval Research Laboratory
FAA	Oklahoma University e Federal Aviation Administration
ARW	Advanced Research WRF
NMM	Nonhydrostatic Mesoscale Model
DTC	Developmental Testbed Center
WPS	WRF Preprocessing System
GFS	Global Forecast System
GDAS	Global Assimilation System
MRF	Medium Range Forecast
SCM	Método das Correções Sucessivas
NMC	National Meteorological Center
PSAS	Physical space analysis system
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
TITAN	Thunderstorm, Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting
CFL	Courant–Friedricks–Lewy

RRTM	Modelo Rápido de Transferência Radiativa
PBL	Camada Limite Planetária
YSU	Yonsei University PBL
OBSPROC	Observation pre-Processor
RADAR	Radio Detection and Ranging
gen_be	generate background error
UPDATE_BC	Update Boundary Conditions
RMSE	raiz do erro médio quadrático
FSS	Fractional Skill Score
FBS	Fractions Brier Score
CCM	Complexo Convectivo de Mesoescala

Lista de Símbolos

x_t	Melhor representação possível do estado na atmosfera no espaço do modelo
x_a	Análise do modelo
x_f	Previsão do modelo
x_b	Estimativa inicial (<i>background</i>)
y	vetor de observações
M	Operador dinâmico
H	Operador da observação
B	Matriz de covariâncias dos erros do <i>background</i>
R	Matriz de covariâncias dos erros da observação
A	Matriz de covariância dos erros da análise
Q	Matriz de covariâncias dos erros da previsão do modelo
K	Matriz de ponderação

Sumário

1	Introdução	23
1.1	Motivação	24
1.2	Objetivos	25
2	Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica	26
2.1	Modelo de previsão WRF	26
2.2	Assimilação de Dados	28
2.2.1	Métodos Empíricos	30
2.2.2	Métodos Estatísticos	32
2.3	TITAN	38
3	Metodologia	40
3.1	Casos Seleccionados	43
3.2	Preparação das observações	43
3.2.1	Estações Meteorológicas	43
3.2.2	RADAR	44
3.3	WRFDA	47
3.4	RMSE e FSS	50
4	Análises	52
4.1	Caso 31-Out-2012 18UTC	52
4.2	Caso 21-Dez-2012 18UTC	65
4.3	Caso 20-Junho-2013 12UTC	76

4.4	Caso 22-Julho-2013 00UTC	85
5	Conclusão.....	95
	Referências Bibliográficas	96

1 Introdução

A previsão de eventos meteorológicos severos, tais como linhas de instabilidade e convecções profundas, é essencial para minimizar os impactos socioeconômicos causados. Para prever esses eventos, modelos atmosféricos são fundamentais para simular o comportamento da atmosfera em todas as escalas, desde global até local.

A previsão numérica do tempo (PNT) é essencialmente um problema de condições iniciais e de contorno (DALEY, 1993; KALNAY, 2003), o que implica em que melhores condições iniciais produzem melhores prognósticos. A assimilação de dados é a técnica pela qual as observações são combinadas com a PNT para melhorar a estimativa inicial do estado da atmosfera. A assimilação de dados variacional faz isso através da minimização de uma função custo das diferenças da análise para com as observações e as estimativas iniciais, ponderadas de acordo com o respectivo erro. (BARKER et al., 2004)

Estudos sobre a assimilação de dados em mesoescala vêm crescendo nos últimos anos acompanhando o surgimento de novos instrumentos e a melhoria da resolução espaço-temporal dos modelos numéricos. Entre eles podemos citar os trabalhos de Sun e Crook (1997) e Sugimoto et al. (2009). No Brasil os esforços nessa área são relativamente novos como o de Vendrasco, Herdies e Angelis (2012).

Neste trabalho o impacto da assimilação de dados é estudado na PNT de curto prazo, o texto foi dividido em cinco capítulos. No Capítulo 1 é dada uma introdução ao tema bem como as motivações e os objetivos. No Capítulo 2 são descritas as fundamentações teóricas seguida de uma revisão bibliográfica sobre a assimilação de dados. As descrições dos instrumentos utilizados e das metodologias é dada no Capítulo 3. As análises dos estudos de caso são apresentadas no Capítulo 4. Por fim, no Capítulo 5, é efetuada a conclusão e a apresentação das referências.

1.1 Motivação

Os modelos numéricos de previsão de tempo de mesoescala são inicializados a partir de condições iniciais e de contorno de um modelo global. No Brasil, apesar de existirem Radares e estações de superfície que cobrem várias regiões do País, muitos desses dados não são assimilados na modelagem de mesoescala de forma operacional devido ao incipiente conhecimento sobre o procedimento da assimilação bem como os impactos causados por essas medidas.

Assimilar os dados disponíveis se faz necessário para obter uma melhor análise da atmosfera ou seja, uma melhor representação da realidade no instante inicial, e consequentemente um modelo capaz de prever eventos severos com maior precisão e acurácia.

Golding (1998) mostrou o baixo índice de acerto para a previsão de curto prazo. A assimilação vem para tentar amenizar essa característica do modelo numérico diminuindo o efeito de “*spinup*”, que consiste em um ajuste físico do modelo aos parâmetros de entrada. Quanto mais adequada a representação da atmosfera mais rápido será o ajuste.

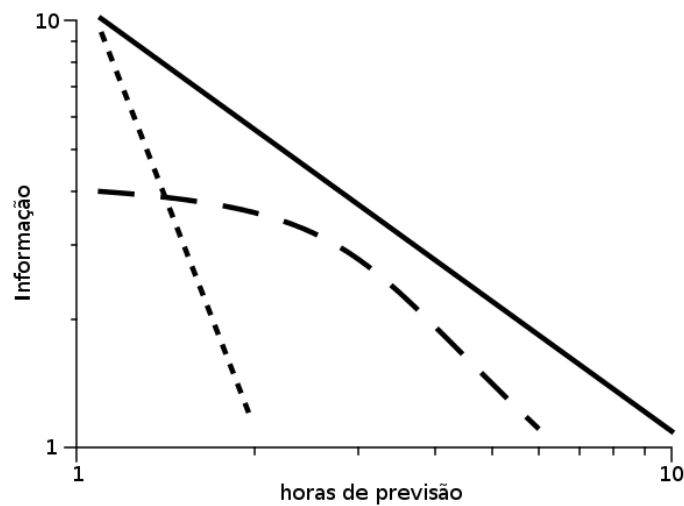


Figura 1.1: Representação esquemática da perda de informação ao longo das horas de previsão. A linha sólida representa o limite teórico de previsão. A linha tracejada representa os modelos numéricos de previsão do tempo e a pontilhada os métodos de nowcasting. Adaptado de (GOLDING, 1998)

O Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) possui dois Radares no Estado

do Paraná, um no município de Teixeira Soares e outro em Cascavel, além de uma rede de estações meteorológicas próprias. Apesar da quantidade de dados disponíveis eles não são utilizados nos modelos de mesoescala em parte devido à complexidade operacional envolvida e em parte por falta de conhecimento do impacto que as diferentes formas de assimilar causam.

O estudo do impacto da assimilação desses dados é fundamental para a melhoria dos prognósticos e para um uso mais efetivo dos mesmos. O Brasil contará em 2015 com pelo menos 40 Radares em operação e a assimilação será possível na maior parte do território nacional.

1.2 Objetivos

Este trabalho visa fazer estudos de caso de fenômenos atmosféricos cujo impacto foi relevante com o intuito de criar embasamento científico a fim de melhorar os prognósticos numéricos. Especificamente os objetivos são:

1. avaliar o impacto da assimilação de dados na previsão de curto prazo;
2. verificar a sensibilidade da assimilação diante de diferentes parâmetros de entrada do modelo de assimilação de dados;

2 Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica

O procedimento de inserir as condições presentes observadas na modelagem numérica é chamada de assimilação de dados. Richardson (1922) foi o primeiro a tentar aplicar as idéias de Bjerknes et al. (1911) para executar uma previsão, mas sua tentativa falhou em boa parte por falta de conhecimento nos conceitos de inicialização. Charney, Fjörtoft e Neumann (1950) conseguiram executar o que Richardson não conseguiu, porém a fase de análise dos dados (que era subjetiva) tomava mais tempo do que a própria previsão. Logo, criou-se a necessidade de automatizar a análise objetiva. (DALEY, 1993)

Charney (1951) desenvolveu um método de interpolação para grades regulares e, Gilchrist e Cressman (1954) criaram um esquema de interpolação polinomial para a altura geopotencial, além de serem os primeiros a proporem métodos automáticos para a qualidade dos dados e o uso do “first guess” (obtido de previsões anteriores) para melhorar a análise. Lorenz (1965) estimou um limite máximo de previsibilidade de aproximadamente duas semanas.

Seguindo os passos de Charney, Rossby criou com sua equipe na Suécia as primeiras previsões do tempo operacionais em 1954 (MEMBERS, 1954).

Durante os anos subsequentes muitos avanços foram feitos em parte pelo surgimento de melhores computadores e dos satélites meteorológicos. Em 1979 as nações do mundo organizaram o *Global Weather Experiment* (GWE) para observar a atmosfera o mais sistematicamente possível e usando a tecnologia mais avançada disponível.

Atualmente os centros de previsão usam como condições iniciais uma combinação estatística de vários tipos de observações diferentes (estações convencionais, satélites, radares etc) com prognósticos de curto prazo (KALNAY, 2003).

2.1 Modelo de previsão WRF

O modelo atmosférico WRF é um modelo de previsão do tempo de mesoescala, desenvolvido tanto para fins de pesquisa quanto operacionais. Foi desenvolvido conjuntamente por uma série de instituições e agências governamentais: *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *Earth System Research Laboratory* (ESRL), *Air Force Weather Agency* (AFWA), *Naval Research Laboratory* (NRL), *Oklahoma University* e *Federal Aviation Administration* (FAA) (SKAMAROCK et al., 2008).

Existem duas versões que se diferenciam por terem núcleos dinâmicos diferentes, o *Advanced Research WRF* (ARW), que é o utilizado neste trabalho, é mantido pela divisão de mesoescala e microescala do NCAR. Já o *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM) é mantido pela comunidade do *Developmental Testbed Center* (DTC) (UCAR; DTC, 2013).

O conjunto de equações do ARW representam escoamento totalmente compressível, com formulação Euleriana e não hidrostática, com uma opção de hidrostática disponível. Ele é conservativo para as variáveis escalares. O modelo usa coordenadas sigma como a coordenada vertical em níveis de pressão hidrostática, sendo o topo uma superfície de pressão constante. A malha horizontal é Arakawa-C. O esquema de integração temporal é o esquema de Runge-Kutta de terceira ordem, e a discretização espacial emprega esquemas de segunda e sexta ordem. O modelo suporta tanto casos idealizados quanto reais com muitas opções de contorno. Ele também suporta opções de aninhamento *one-way*, *two-way* e *moving*. E ainda é capaz de ser executado em computadores com memória compartilhada ou distribuída (SKAMAROCK et al., 2008).

O “*WRF Preprocessing System*” (WPS) é um conjunto de três programas que preparam a entrada para a simulação numérica. O *geogrid.exe* define e interpola os dados geográficos para os pontos de grade. O *ungrib.exe* extrai os campos meteorológicos dos arquivos com formato GRIB (o mesmo tipo utilizado pela saída do modelo GFS). E o *metegrid.exe* interpola os campos extraídos para a grade do modelo (WANG et al., 2014).

Depois do WPS, mas antes da modelagem em si, é preciso executar o *real.exe*, que é responsável pelas interpolações verticais dos campos meteorológicos para os níveis do modelo. O *real.exe* gera dois arquivos: “*wrfinput*” e “*wrfbdy*”. O primeiro é a condição inicial para a integração do modelo, no caso de ser assimilado, é visto como estimativa inicial (x_b), caso contrário passa a ser a análise (x_a). O segundo arquivo contém as condições de contorno, e caso seja assimilado, é preciso atualizá-lo.

Por fim o modelo é executado por meio do programa *wrf.exe*, gerando a previsão no arquivo *wrfout*. Esse último pode também ser usado como estimativa inicial (*background*) para uma nova assimilação, mas nos experimentos as assimilações se deram pelas saídas do *real.exe*.

As condições iniciais e de contorno utilizadas são as geradas pelo modelo atmosférico GFS (Global Forecast System) que foi implementado em 1981 e continua operacional até os dias atuais. Dividido em dois módulos sendo o primeiro deles a assimilação de dados feita pelo GDAS (Global Assimilation System), o segundo módulo é o modelo espectral MRF (Medium Range Forecast). O cálculo da maioria das derivadas horizontais é feito espectralmente a partir dos harmônicos, sendo extremamente acurados. Entretanto, assim como os modelos com representação por pontos de grade, os modelos espectrais apresentam erros de truncamento. Atualmente o modelo GFS é rodado quatro vezes ao dia com início de previsão iniciando às 00, 06, 12 e 18 horas UTC e disponibilizados com uma resolução horizontal de $0,5^\circ$, esta saída é utilizada como condição de contorno e inicial do modelo WRF.

Um conjunto de saídas do modelo WRF foi utilizado para gerar a matriz de covariância dos erros do *background*.

2.2 Assimilação de Dados

A análise é a representação mais acurada do estado da atmosfera em um determinado tempo e é usada como condição inicial para os modelos numéricos de tempo. A informação objetiva básica para produzir a análise é o conjunto de valores observados do verdadeiro estado da atmosfera. Se há observações suficientes para determinar a atmosfera então a análise é apenas uma interpolação, mas em geral não é o que ocorre (LORENC, 1986), uma vez que as observações são esparsas e relacionadas às variáveis meteorológicas de forma indireta. Para criar uma análise é preciso contar com algumas informações básicas (*background*) na forma de uma estimativa *a priori* do estado do modelo. Restrições físicas sobre o problema da análise também ajudam. A informação do *background* pode ser a climatológica, mas também pode ser gerada a partir da saída de uma análise prévia utilizando-se algumas suposições de consistência no tempo do estado do modelo, como estacionariedade (hipótese de persistência) ou a evolução prevista por um modelo de previsão. Em um sistema bem comportado espera-se que isso permita que a informação se propague no tempo.

Existem duas abordagens básicas para a assimilação de dados: assimilação sequencial, que só considera informações passadas até o tempo da análise, que é o caso dos sistemas de assimilação em tempo real e a assimilação não sequencial, onde informações do futuro podem ser usadas (reanálise). Outra distinção pode ser feita entre os métodos, podendo ser classificados como intermitentes ou contínuos. No método intermitente as observações podem ser processadas em pequenos lotes. Em um método contínuo, como o 4D-VAR, os lotes de observação ao longo de períodos mais longos são considerados, e a correção para o estado analisado é suavizado no tempo, o que é fisicamente mais realista (BOUTTIER; COURTIER, 1999). Na figura 2.1 é apresentada uma representação esquemática dos quatro esquemas.

O verdadeiro estado da atmosfera nunca poderá ser completamente representado uma vez que a resolução do modelo é menor do que da realidade, e a análise buscada é dita como o verdadeiro estado do modelo, ou seja a melhor representação possível de se alcançar na resolução do modelo. Mesmo se as observações não tivessem erros e a análise fosse igual ao estado verdadeiro ainda haveriam discrepâncias entre os valores observados e seus equivalentes na análise devido aos erros de representatividade. Esses erros serão tratados como parte do erro de observação, mas deve-se ter em conta que dependem da discretização do modelo e não de problemas instrumentais.

2.2.1 Métodos Empíricos

Uma forma de projetar um esquema de análise é forçar o modelo como sendo igual ao valor observado. Essa é a base da análise de Cressman (CRESSMAN, 1976) (Fig.2.2) o qual é muito usado por sistemas de assimilações simples (WARNER, 2011).

Supondo que o modelo seja univariado, se denotarmos x_b como uma estimativa prévia do estado do modelo (background) e $y(i)$ as observações para $i = 1, \dots, n$ do mesmo parâmetro, uma análise de Cressman simples pode ser definida com base na equação de atualização:

$$x_a(j) = x_b(j) + \frac{\sum_{i=1}^n w(i,j) \{y(i) - x_b(i)\}}{\sum_{i=1}^n w(i,j)} \quad (2.1)$$

$$w(i,j) = \max\left(0, \frac{R^2 - d_{i,j}^2}{R^2 + d_{i,j}^2}\right)$$

onde $d_{i,j}$ é a distância entre os pontos i e j ; $x_b(i)$ é o *background* interpolado para o ponto i ; a função de ponderação $w(i,j)$ é 1 se o ponto de grade j está localizado na posição i da

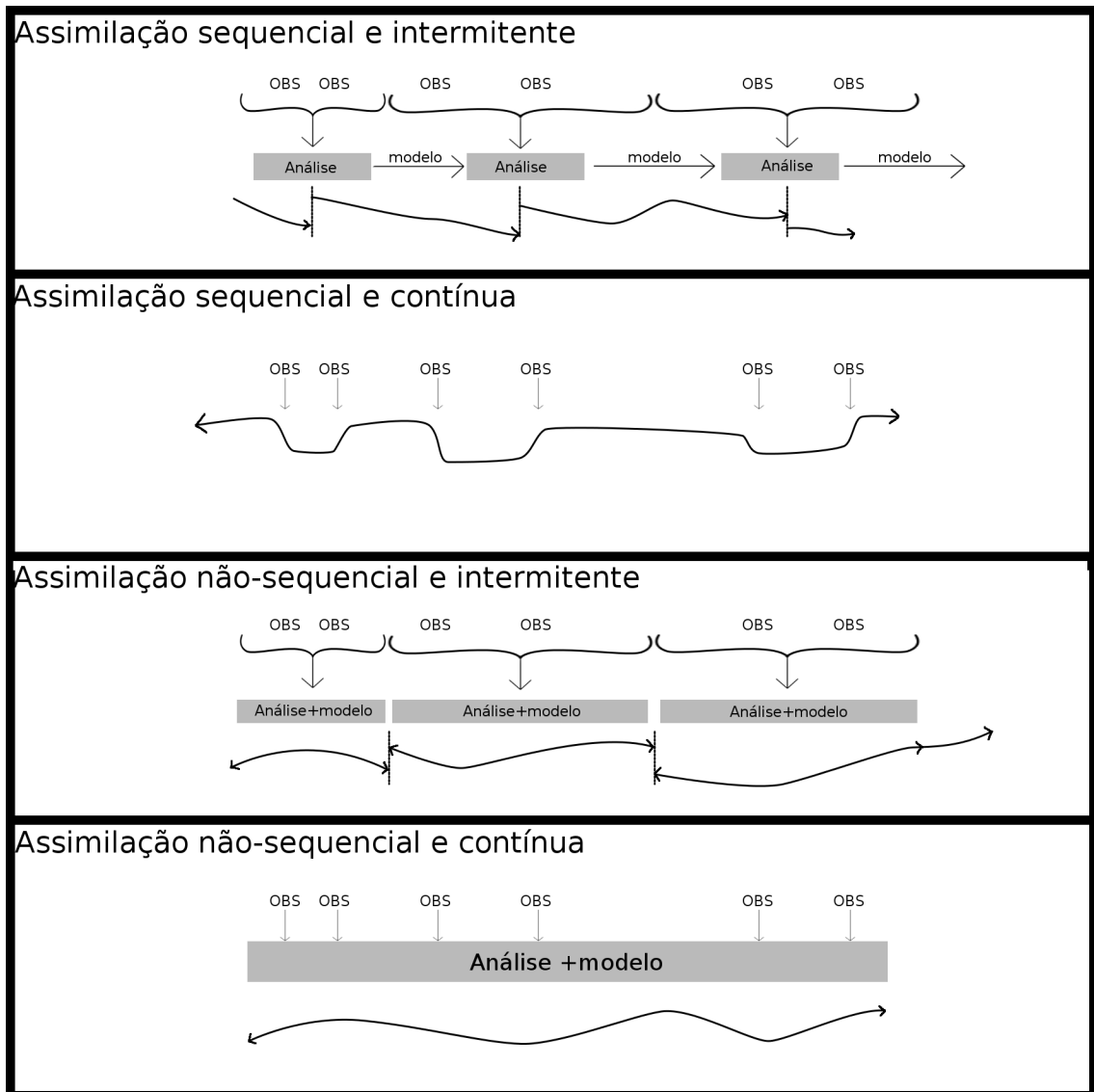


Figura 2.1: Esquema de quatro estratégias para assimilação de dados em função do tempo. A forma como a distribuição temporal das observações é processada para produzir a sequência de estados assimilados (curva inferior em cada quadro) pode ser sequencial ou contínua. Adaptado de (NCAR, 2013)

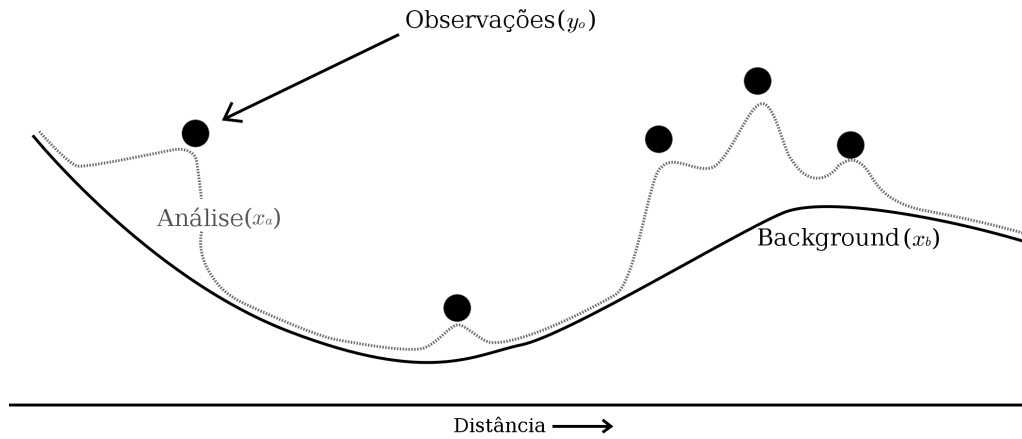


Figura 2.2: Esquema da análise de Cressman para uma variável. Adaptado de (WARNER, 2011)

observação, ela é uma função decrescente com a distância a qual é zero se $d_{i,j} > R$, onde R é um raio de influência arbitrário além do qual as observações não tem peso.

A Fig. 2.3, adaptada de (KALNAY, 2003), apresenta graficamente o conceito do raio de influência para um campo bidimensional.

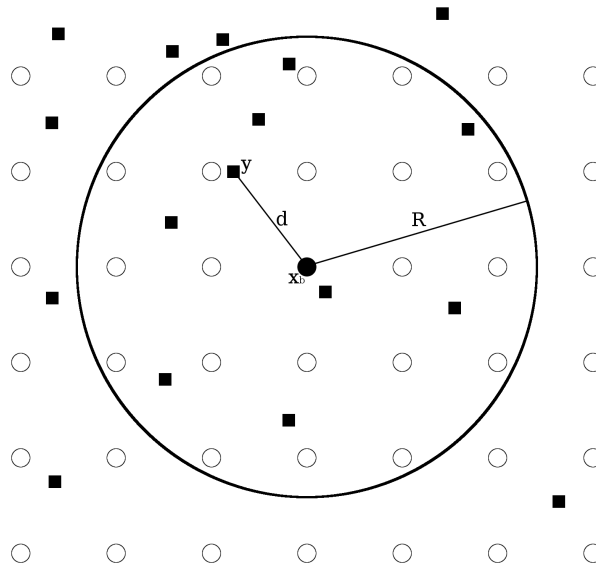


Figura 2.3: Raio de influência das observações (círculo grande), pontos de grade do modelo (círculos pequenos) e observações (quadrados) em torno de um ponto de grade (círculo preto). (KALNAY, 2003)

Existem muitas variações do método de Cressman. Um algoritmo mais geral é o método das correções sucessivas (SCM). Uma das suas características é que o peso pode

ser menor do que 1 para $i = j$, o que significa que é feita uma média ponderada entre o background e as observações. Outra característica é que atualizações podem ser feitas várias vezes a fim de melhorar a suavidade das correções. O SCM bem ajustado pode ser tão bom como qualquer outro método, mas não existe uma maneira direta de determinar os pesos ótimos (DALEY, 1993).

Outro método empírico para proceder com a assimilação de dados é a Relaxação Newtoniana ou *nudging* que consiste em adicionar um termo às equações prognósticas para aproximar os resultados aos valores das observações interpolados à grade do modelo (HOKE; ANTHES, 1976). Um exemplo da aplicação desse termo pode ser visto na equação 2.2, sendo f uma variável dependente, os termos de processos físicos representado por F , f_{obs} o valor observado de f interpolado ao ponto de grade e τ é a escala de tempo da suavização. Se a escala de tempo for muito pequena, a solução do modelo converge para a observação muito rápido e as outras variáveis não terão tempo para se ajustar dinamicamente. Por outro lado, se a escala de tempo for muito grande os erros na solução do modelo não serão corrigidos pelas observações. (WARNER, 2011).

$$\frac{\delta f}{\delta t} = F(f, x, t) + \frac{f_{obs} - f}{\tau(f, x, t)} \quad (2.2)$$

Os métodos empíricos têm muitas limitações como por exemplo: substituir uma boa análise pelas observações mesmo quando estas forem de baixa qualidade; dificuldades em determinar como deve ser a função de ponderação; e incoerência física da análise devido a erros aleatórios das observações.

2.2.2 Métodos Estatísticos

Na seção 2.2.1, utilizar o método de Cressman pode comprometer a estimativa inicial ou mesmo as propriedades físicas do sistema se as observações não forem boas. Todas os dados são importantes fontes de informação, mas não podemos confiar completamente em nenhum. Existem erros nas observações e no próprio modelo e para escolher o melhor valor dentre eles é preciso uma estratégia que minimize em média o erro da representação da atmosfera (análise). As incertezas dos dados podem ser medidas calibrando seus erros estatísticos, e podem ser modeladas usando conceitos probabilísticos. Fazendo com que o erro da análise seja mínimo permite que o problema seja escrito como uma otimização, ou seja, a análise passa a ser a solução cujo erro é o menor possível.

Basicamente os métodos estatísticos trabalham com a minimização por mínimos

quadrados para encontrar os fatores de ponderação das observações e do *background* ou a própria variável através de uma função custo da forma:

$$J(x) = \frac{1}{2}(J_o(x) + J_b(x)) \quad (2.3)$$

onde os subíndices *o* e *b* denotam respectivamente observação e *background*, e *x* representa a variável que se deseja encontrar.

A figura 2.4, adaptada de (WARNER, 2011), mostra como as duas funções são combinadas para obter uma análise ótima. A curva J_o representa a minimização do erro em relação às observações cujo mínimo em relação a uma variável arbitrária T é dada por T_o . A curva J_b , cujo o mínimo é dado por T_b , mostra a minimização em relação ao *background*. O valor T_a que minimiza a soma de ambos os termos é a análise procurada.

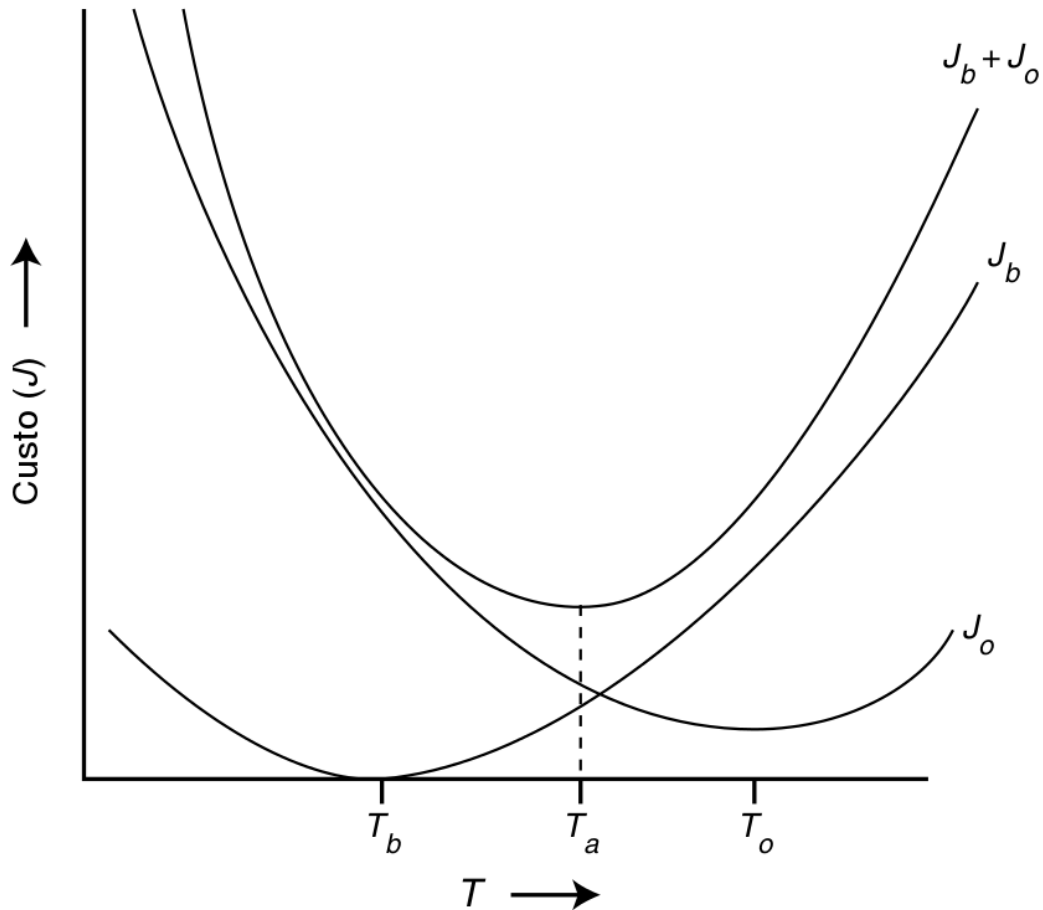


Figura 2.4: Esquema mostrando como as duas funções custo, J_o e J_b , são combinadas para obter um valor mínimo no erro da análise. Adaptado de (WARNER, 2011).

Algumas definições de variáveis se fazem necessárias para a melhor compreensão dos métodos estatísticos apresentados a seguir. A notação será a mesma proposta por

Ide et al. (1997), que perceberam a necessidade de uma unicidade entre as notações dos trabalhos que envolvem assimilação de dados.

Os vetores listados abaixo podem representar tanto uma como várias variáveis, o tamanho desses vetores é o produto entre o número de variáveis e o número de pontos de grade, assim o vetor que contém as observações terá uma dimensão menor do que aqueles definidos na grade do modelo.

A lista abaixo de definições para os vetores de estado e observações é abundante em toda a bibliografia sobre o tema:

- x_t : É o estado verdadeiro do modelo, ele descreve a melhor representação possível que pode ser definida na grade do modelo. Como dito antes ele não é o estado real da atmosfera.
- x_a : Vetor com a análise do modelo, a incógnita no problema da assimilação de dados.
- x_f : Vetor de previsões do modelo.
- x_b : É o vetor com a estimativa inicial (*background*) do modelo. Se for usado uma previsão para defini-lo, então $x_b = x_f$.
- y : Vetor de observações. Observe que a dimensão desse vetor é menor do que dos precedentes.

Os seguintes operadores são necessários para integrar no tempo as equações e mudar entre os espaços do modelo e das observações

- M : Operador dinâmico, responsável por avançar o vetor de previsões no tempo ($x_f(t+1) = M[x_f(t)]$)
- H : Operador da observação, transforma um vetor no espaço do modelo (n) para o espaço das observações (p).

As matrizes de covariância são definidas da seguinte forma:

- B : É a matriz de covariância dos erros do *background*. Essa matriz é a responsável por controlar a influência do incremento da análise definindo como a informação da observação se distribuirá na grade da análise e ponderando as observações com base

na magnitude do erro. Quanto mais acurada for essa matriz melhor será o ajuste das informações do *background* com as observações (maior eficácia no aproveitamento das observações), obtendo-se uma melhor análise. No caso multidimensional a matriz B é simétrica cuja diagonal são as variâncias dos erros do *background* (ϵ_b) e fora da diagonal as covariâncias, como segue: $B = \overline{(\epsilon_b - \bar{\epsilon}_b)(\epsilon_b - \bar{\epsilon}_b)^T}$

A matriz de covariância de erros do *background* é fundamental para a solução do problema da assimilação de dados, no entanto os erros das informações do *background* não são conhecidos, uma vez que o verdadeiro estado da atmosfera também não é. Para contornar esse problema foi utilizado o método proposto por Parrish e Derber (1992), denominado por National Meteorological Center (NMC), antigo nome do NCEP, que é baseado inteiramente em diferenças entre simulações numéricas para um mesmo tempo. Para mais informações sobre os métodos para a obtenção da matriz B , Warner (2011) dedica alguns parágrafos com uma visão geral do assunto.

- R : É a matriz de covariância dos erros da observação ($\epsilon_o = y - H(x_t)$). As variâncias são geralmente estimadas com base nos conhecimentos das características dos instrumentos, mesmo sendo os erros de representatividade e do operador H também importantes. Como os erros das observações geralmente são supostos independentes, a matriz R é diagonal ou quasi-diagonal.
- A : A matriz de covariância dos erros da análise ($x_a - x_t$)
- Q : Matriz de covariância dos erros da previsão do modelo ($x_f - x_t$)

O problema da assimilação de dados consiste em encontrar a melhor análise (x_a) com base no *background* (x_b) e nas observações (y). Uma maneira de conseguir isso é adicionar a diferença entre o observado e o *background* (essa diferença é comumente chamada de inovação) ao próprio *background* de forma ponderada, como na expressão a seguir:

$$x_a = x_b + K(y - H[x_b]) \quad (2.4)$$

K é matriz pela qual a inovação será ponderada para produzir a análise e é dada por:

$$K = BH^T(HBH^T + R)^{-1} \quad (2.5)$$

Da equação 2.5 deduz-se que quanto maior as covariâncias no *background* maior será o peso dado para as observações e, quanto maiores forem as incertezas das observações menores serão os incrementos das mesmas na análise.

A interpolação ótima é um dos principais métodos estatísticos e, assim como o 3D-VAR descrito a seguir, tem como vantagem sobre o método de Cressman o fato de que as distribuições dos incrementos da análise serem definidas pela matriz de covariância do erro do *background*, que é obtida a partir de soluções anteriores do modelo ou climatologia. As equações 2.4 e 2.5 são a base para esse método. As vantagens do uso da interpolação ótima estão na simplicidade de sua implementação e no baixo custo computacional.

3D-VAR

A análise variacional tridimensional também resolve o problema de determinar a melhor representação da atmosfera, mas com a diferença de que ao invés de procurar por um peso ótimo através dos mínimos quadrados, procura um vetor de análise que minimize uma função custo que é medida da distância da análise tanto em relação ao *background* quanto à observação, a primeira diferença é ponderada pela covariância do erro do *background* e a segunda pela covariância do erro da observação. Resolver o problema da análise em ambas as formas é equivalente, como descrito por (WARNER, 2011). Matematicamente a função custo é representada por:

$$J(x) = J_b(x) + J_o(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T B^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}(H(x) - y)^T R^{-1}(H(x) - y) \quad (2.6)$$

O primeiro termo do lado direito corresponde à diferença entre a variável de estado e a estimativa inicial (*background*) ponderada pelo erro das covariâncias do *background* (B). O segundo termo refere-se à diferença entre o vetor de estado e as observações (no espaço das observações) ponderadas pela erro das covariâncias das observações (R). Ambos os termos são escalares e a análise será o mínimo valor possível para $J(x)$.

A vantagem de abordar o problema através da minimização de uma função custo reside no fato de que muitas das simplificações feitas na interpolação ótima, como a escolha de um raio de influência, não serem necessárias neste método. Isso implica em uma análise mais adequada porque utiliza uma aproximação mais próxima da realidade.

Além disso, a matriz de covariância B é obtida pelo método NMC no caso do 3D-VAR e foi mostrado por Rabier et al. (1998) que a rede de radiossondas usadas para obter a matriz de covariância dos erros do *background* no método da interpolação ótima não é densa o suficiente para estimar estruturas. Porém, no caso do 3D-VAR a matriz B não depende do regime da atmosfera, o que é uma desvantagem.

O 3D-VAR ainda tem a vantagem de assimilar os dados de medidas indiretas,

como a refletividade do radar, de modo direto, o que implica em menores covariâncias na matriz R . O operador de observação para a velocidade radial (V_r) é definido pela equação (SUGIMOTO et al., 2009):

$$V_r = \frac{1}{r}[(x_d - x_r)u + (y_d - y_r)v + (z_d - z_r)(w - V_t)] \quad (2.7)$$

$$r = \sqrt{(x_d - x_r)^2 + (y_d - y_r)^2 + (z_d - z_r)^2}$$

onde (x_d, y_d, z_d) é a posição do dado de radar e (x_r, y_r, z_r) representa a localização do radar. As componentes u , v e w compõem o campo do vento tridimensional e V_t é a velocidade terminal da precipitação (no caso, gotas de chuva).

Já o operador de observação para a refletividade Z é dado por (SUN; CROOK, 1997):

$$Z = 43.1 + 17.5 \log(\rho q_r) \quad (2.8)$$

onde ρ é a densidade do ar e q_r é a razão de mistura de água de chuva. A relação acima é comumente chamada de relação $Z - q_r$ e é derivada supondo uma distribuição de tamanho de gotas de chuva de Marshall-Palmer (SUN; CROOK, 1997). Na prática outras relações empíricas além da de Marshall-Palmer são encontradas, e pode-se citar o trabalho de (SANTOS, 2014) que utilizou-se de dados sobre o Estado do Paraná. Porém, no WRF3D-VAR essa relação não pode ser controlada pelo usuário (LIU; BRAY; HAN, 2013).

Outros métodos estatísticos ainda podem ser citados como o Physical Space Analysis System (PSAS), 4D-VAR e Filtro de Kalman. Todos eles resolvem o mesmo problema, mas com diferenças em relação ao 3D-VAR. No caso do PSAS a minimização é realizada no espaço das observações (COHN et al., 1998). O 4D-VAR é uma extensão do 3D-VAR, que permite que as observações sejam distribuídas dentro de um intervalo temporal (BOUTTIER; RABIER., 1997). Já o filtro de Kalman e suas variações se assemelham mais à interpolação ótima, com a diferença que a matriz de covariâncias dos erros do *background* é variável no tempo e não constante, como a obtida pelo método NMC (KALNAY, 2003).

Nesse trabalho os esforços foram concentrados no 3D-VAR. A escolha por esse método foi baseada na facilidade de instalação e implementação, não necessidade de um modelo adjunto, que aumentaria o custo computacional, a simplicidade para obtenção da matriz B e quantidade de material de apoio disponível.

A primeira implementação operacional do 3D-VAR foi em 1991 (PARRISH; DERBER, 1992) e a assimilação direta de radiâncias em céu limpo somente em 1995 (DERBER; WU, 1998) e os dados brutos em 1998 (KALNAY, 2003). Barker et al. (2001) apresentaram uma implementação do 3D-VAR para o modelo numérico MM5, o que viria a se tornar o WRFDA 3D-VAR. Foi proposto por Gao et al. (2003) um filtro recursivo junto com o 3D-VAR para assimilar as velocidades radiais a fim de contornar as deficiências com as velocidades verticais nas condições de fronteiras. Xiao et al. (2005) verificaram o impacto positivo da assimilação da velocidade radial na previsão de curto prazo de tempestades. A administração meteorológica Coreana também implementou operacionalmente um sistema de assimilação de dados de Radar com impactos positivos na previsão de precipitação (XIAO et al., 2008). A matriz das covariâncias do erro do *background* desempenham um papel importante e a sensibilidade da assimilação a essa matriz para um evento de chuva severa foi avaliada por HA e Lee (2012). A assimilação do radar é mais efetiva quando combinada com dados meteorológicos convencionais como mostrado por Liu, Bray e Han (2013). Vale lembrar que no trabalho de Wang et al. (2013) foi observado que a assimilação indireta pode ter resultados mais positivos do que a assimilação direta por evitar a linearização dos erros da relação $Z - q_r$.

No Brasil têm crescido o número de esforços na área de assimilação de dados de refletividade no modelo regional utilizando o 3D-VAR. Podemos citar os trabalhos de Silva, Silva e Yamasaki (2012) que fizeram um estudo de caso sobre a assimilação de refletividade de um radar, o de Santos et al. (2012) que estudaram o 3D-VAR no MBAR operado pelo Instituto Nacional de Meteorologia(INMET), também o trabalho de Vendrasco, Herdies e Angelis (2012) que usou a assimilação de dados de radar para melhorar a previsão de curto prazo no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos(CPTEC), por fim na dissertação de Beck (2013) são apresentados resultados do uso do 3D-VAR para assimilar dados de estações do INMET e radiosondagens no modelo WRF.

2.3 TITAN

“Thunderstorm, Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting” (TITAN) foi projetado como um algoritmo para identificar e acompanhar tempestades baseado nos dados do radar com o objetivo de analisar as mudanças do tempo (DIXON; WIENER, 1993). Desde então o algoritmo foi melhorado pelo NCAR com a inclusão da capacidade em fazer previsão e outras análises. Atualmente o TITAN é um conjunto de software relativamente grande capaz de gerenciar vários tipos de radar, assim como suporte a

satélites, sensores de raios, observações em superfície e modelos numéricos (KOKITSU, 2005).

Este método define as tempestades como regiões tridimensionais de refletividades excedendo um determinado limiar, que no presente trabalho foi de 35dBz, e combinando-as de modo lógico, entre duas observações consecutivas de radar. O método usa como base as informações do radar em coordenadas cartesianas. A componente de rastreamento está baseada na solução otimizada do problema de “matching”, e não na hipótese sobre a velocidade inicial da tempestade. Fusões e divisões –“merge” e “split” - são identificadas através de lógica geométrica considerando as posições e formas das tempestades. Por fim, as previsões são baseadas no ajuste linear considerando o histórico da tempestade em relação às suas posições e formas. O sistema foi projetado para funcionar em tempo real, com dados de radar, provendo a análise e a previsão num tempo aproximado de 10 segundos a partir do término de coleta da varredura volumétrica.

O prognóstico fornecido por ele é de 1h e fica armazenado em arquivos XML contendo as formas geométricas dos núcleos.

3 Metodologia

O domínio utilizado no modelo de previsão do tempo WRF é constituído de 3 grades aninhadas com resoluções de 27, 9 e 3km respectivamente. A mais grosseira abrange o Sul do Brasil, a intermediária compreende o Estado do Paraná e a mais fina sobre a área de aproximadamente 240km em torno do radar de Teixeira Soares/PR (figura 3.1)

O modelo conta com 50 níveis verticais distribuídos de maneira não uniforme a fim de representar melhor os fenômenos próximos à superfície. A pressão no nível mais alto foi definida como 40hPa (figura 3.2). O intervalo de tempo para cada integração foi de 135s para a malha mais grossa, decaindo à uma razão de 3 a cada grade. Esse passo de tempo segue as recomendações do manual do WRF que sugere no máximo $6dx$, onde dx é a resolução horizontal do modelo, essa medida tem como objetivo evitar a violação das condições de Courant–Friedricks–Lewy (CFL) (KALNAY, 2003 apud COURANT; FRIEDRICH; LEWY, 1928). A opção microfísica utilizada foi a de Morrison de 2 momentos (MORRISON; THOMPSON; TATARSKII, 2009). A previsão em dois momentos tem uma melhor discretização das distribuições dos tamanhos das partículas, o que é crucial para calcular as taxas dos processos microfísicos e evolução da nuvem (SKAMAROCK et al., 2008). A opção de radiação de onda curta é o Modelo Rápido de Transferência Radiativa (RRTM) (MLAWER et al., 1997), e para onda longa é a de Dhudia (1989). A parametrização de camada limite planetária é a Yonsei University PBL (YSU) (HONG; NOH; DUDHIA, 2006). A parametrização de cumulus é a de Kain-Fritsh, a qual utiliza o método da parcela Lagrangeana para estimar onde existe instabilidade, onde ocorrerá instabilidade para o desenvolvimento de nuvem e quais propriedades das nuvens convectivas (KAIN, 2004).

Durante algumas execuções o modelo apresentou instabilidade, após análise foi visto que distorções na velocidade vertical próximas ao topo do modelo estavam causando o problema. A fim de resolver tais instabilidades foram definidas duas opções de suavizações para o topo do modelo definidas pelas opções *w_damping*, que determina

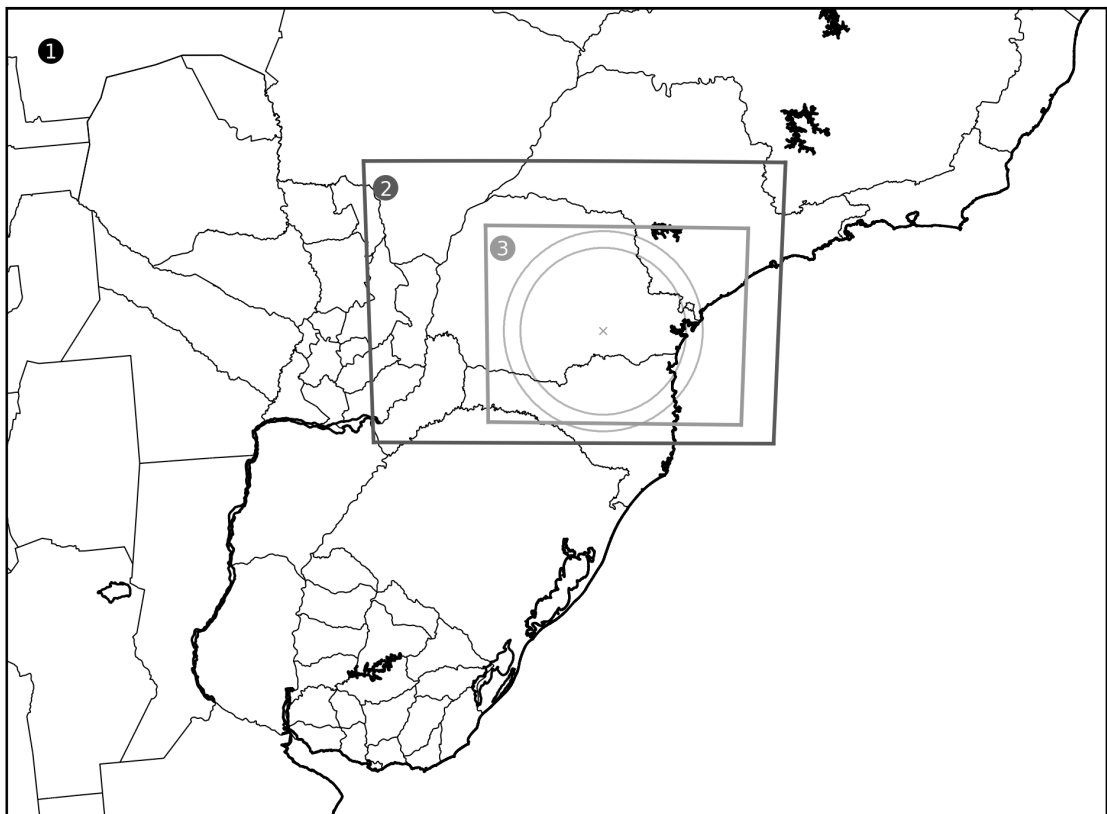


Figura 3.1: Representação do domínio utilizado na modelagem numérica. Malhas 1, 2 e 3 com 27km, 9km e 3km de resolução horizontal respectivamente. Os círculos representam as áreas de varredura do radar nas tarefas de 200Km(círculo menor) e 240Km(círculo maior). A letra X indica o centro do radar

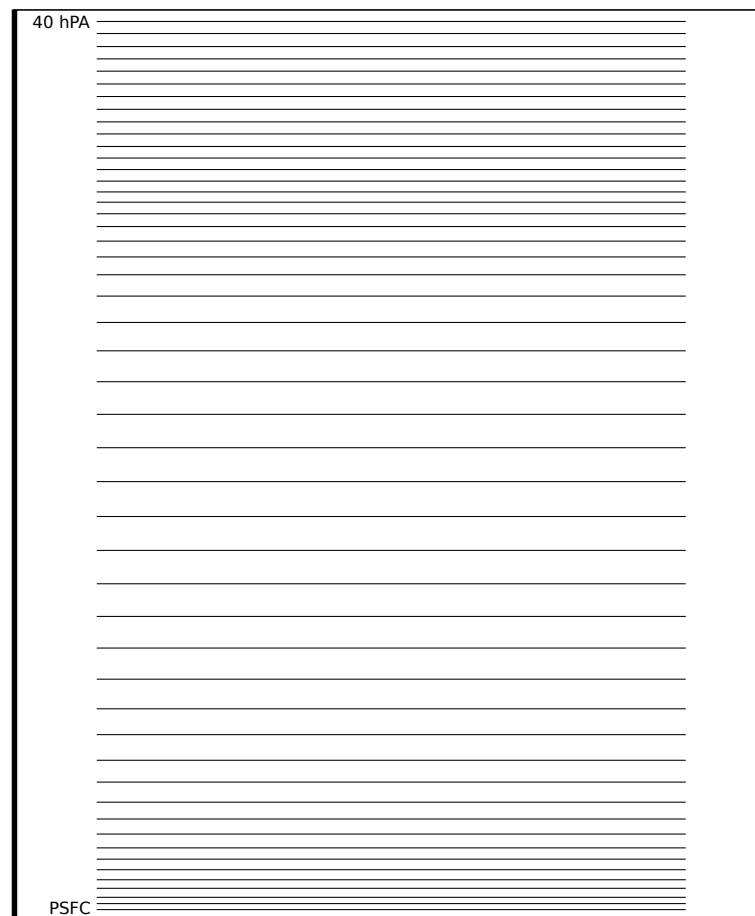


Figura 3.2: Distribuição dos 50 níveis verticais do modelo. O nível mais baixo é a pressão em superfície e o topo é definido como 40hPa.

Tabela 3.1: Principais parametrizações utilizadas no modelo numérico WRF versão 3.5.

opção	descrição	malha 1	malha 2	malha 3
time_step	passo de tempo para integração (s)	135	45	15
mp_physics	opção microfísica	Morrison 2-moment	Morrison 2-moment	Morrison 2-moment
ra_lw_physics	radiação de onda longa	RRTM	RRTM	RRTM
ra_sw_physics	radiação de onda curta	Dudhia	Dudhia	Dudhia
bl_pbl_physics	opção de camada limite	YSU	YSU	YSU
cu_physics	parametrização de cumulus	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	nenhum
w_damping	amortecimento do vento vertical	sim	sim	sim
damp_opt	amortecimento dos movimentos vertical	W-Rayleigh	W-Rayleigh	W-Rayleigh

se a velocidade vertical será amortecida ou não, e *damp_opt*, que cria uma camada de suavização levando os movimentos para zero no topo do modelo.

3.1 Casos Selecionados

Foram escolhidos para análise quatro casos: 31/10/2012, 21/12/2012, 20/06/2013 e 22/07/2013. A escolha de cada um teve como base a disponibilidade de dados para o dia em questão, proximidade ao radar e tipo de evento. A escala espacial desses eventos variaram entre escala de nuvem até escala planetária (sinótica). A descrição de cada caso é apresentada conjuntamente aos resultados no capítulo 4.

3.2 Preparação das observações

Os dados para a realização deste trabalho foram cedidos pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). Concomitante às rotinas de armazenamento de dados são efetuados controles de qualidade sobre eles, por isso supõem-se confiáveis e não foram desenvolvidas rotinas de controle próprias. Em um estudo recente, porém, Oliveira (2014) mostrou a necessidade de correção da banda brilhante no radar Doppler de Teixeira Soares operado pelo SIMEPAR.

Para que fosse possível realizar a assimilação foi preciso antes prepará-los para um formato de leitura do WRFDA.

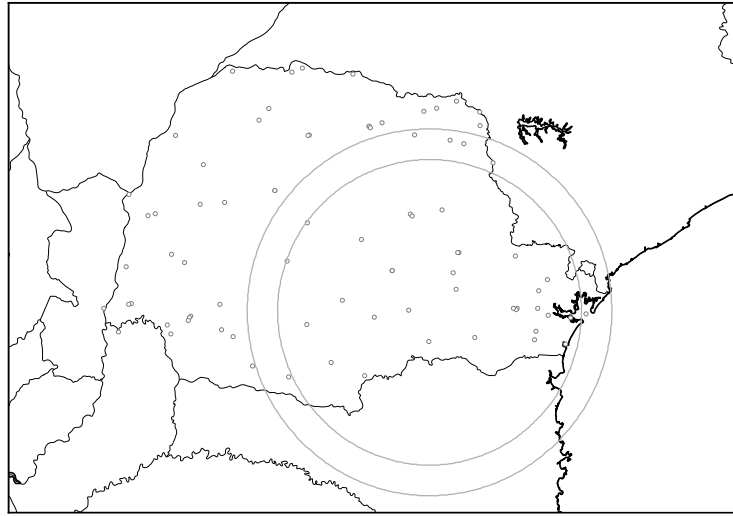


Figura 3.3: Estações meteorológicas automáticas operadas e mantidas pelo SIMEPAR.

-25.68333	-53.08333	Estacoes Parana			Estacao 25415305			FM-12 SYNOP							
520.00000	1	-888888	-888888	7	-888888	T	F	F	-888888	-888888	20121031170000	-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0
-888888.00000	0	-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0
94690.00000	0	520.00000	0	297.75000	0	291.55000	0	6.10000	0	204.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0
-777777.00000	0	-777777.00000	0	1.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0-888888.00000	0
1	0	0													

Figura 3.4: Exemplo de *record* com dados de estações meteorológicas. Cabeçalho em vermelho, dados medidos em preto negrito e código para fim do *record* em verde.

3.2.1 Estações Meteorológicas

As estações utilizadas neste trabalho estão localizadas dentro do Estado do Paraná cujos dados estavam disponíveis na base de dados do SIMEPAR e aprovadas no controle de qualidade. Ao todo são 80 estações distribuídas segundo figura 3.3, para cada caso nem sempre todas as estações estavam disponíveis.

Os dados convencionais são inseridos no pacote de assimilação por meio do programa “*Observation pre-Processor*”(OBSPROC). Esse programa remove as observações fora do domínio, exclui observações duplicadas e incompletas, garante a consistência vertical de sondagens, remove erros grosseiros e rejeita observações cuja diferença ao *background* seja maior do que cinco vezes o erro da observação (BARKER et al., 2004).

A entrada para o OBSPROC é em formato Little_R, que é uma padronização de um arquivo ASCII (GUO; LI, 2012) composto por *reports*, sendo eles um conjunto de *records* como visto na figura 3.4. Uma rotina computacional, desenvolvida em python, efetua a consulta ao banco de dados e formata o arquivo de saída para gerar o arquivo de observações.

As variáveis utilizadas foram pressão em superfície, altitude da estação, temperatura, temperatura do ponto de orvalho, velocidade e direção do vento. Esses dados com uma resolução temporal de 15min.

3.2.2 RADAR

Radio Detection and Ranging (RADAR) é usado em meteorologia como uma técnica de sensoriamento remoto ativo, enviando pulsos de microondas e medindo a energia retroespalhada que retorna.

O SIMEPAR conta com dois radares: um no município de Teixeira Soares/PR e outro em Cascavel/PR, sendo este último operado desde o final de 2013. Para os estudos feitos nesse trabalho somente o radar de Teixeira Soares foi utilizado. O modelo do radar de Teixeira Soares é o DWSR-95S (NETO, 2008), trata-se de um equipamento Banda-S Doppler, fornecendo não somente informações sobre a refletividade, mas também dados sobre o movimento, através da velocidade radial do alvo e a medida da largura espectral. A frequência de operação está entre 2700MHz e 2900MHz. A antena de 8,2m de diametro possui um alimentador central e polarização horizontal. As elevações permitidas vão de -2° a 90° , com rotação de 360° tanto no sentido horário quanto no anti-horário. As características técnicas estão descritas na tabela 3.2

A refletividade é uma medida proporcional à sexta potência do tamanho das gotas dentro de uma área, quanto maior for o valor da refletividade maiores serão os hidrometeoros presentes naquele volume, a equação 2.8 explicita como essa medida é assimilada diretamente.

São ditos radares Doppler aqueles que emitem um sinal de referência pelo qual mudanças na fase na frequência dos pulsos recebidos é reconhecida. Tais radares são ditos “coerentes”, isto é, eles mantêm uma relação contínua entre as fases e as frequências das ondas (OFCM, 2005). Esse fato faz com que o radar seja capaz de medir a velocidade radial (de aproximação ou afastamento em relação ao radar) dos alvos. As medidas de velocidade radial são assimiladas diretamente por meio do operador definido na equação 2.7.

A largura espectral é uma medida do desvio padrão das medidas obtidas em um volume, dando um indicativo da turbulência no mesmo (OLIVEIRA, 2014).

Onda mais curtas conseguem determinar melhor alvos menores como gotas, porém quanto menores os comprimentos maior é a atenuação. Além disso, a velocidade máxima

Tabela 3.2: Características Técnicas do Radar DWSR-95S do SIMEPAR. Fonte: Saraiva (2006).

Antena	
Tipo	Refletor Parabólico com center feed
Diâmetro	8,20m
Ganho	45 dB Nominal
Largura de Feixe	0,95 graus
Polarização	Linear Horizontal
Lóbulos Laterais	23dB abaixo do principal (sem radomo)
Radomo	
Tamanho	10,62m
Perda na Transmissão	0,5 dB
Deflexão no feixe	menor que 0,1 grau
Pedestal	
Tipo	Elevação sobre Azimute
Azimute	360 graus contínuos – manual e automático
Limites de Elevação	-2 a 90 graus
Velocidade em Azimute	De 0 à 6 RPM - CW/CCW variável
Transmissor	
Tipo	Magnetron coaxial
Frequência de operação	2.700 a 2.900 MHz
Frequência de Repetição de Pulsos (PRF)	250 a 934 Hz (variável)
Largura de Pulso	2,0 e 0,8 micro segundos
Potência de Pico	850 kW mínimo
Receptor	
Logarítmico	90 dB +/- 1 dB mínimo
Linear	26 dB a 80 dB com AGC
Oscilador Local	STALO com AFC
Velocidade Doppler	50 m/s com PRFs 4:3
Sensibilidade MDS	-111 dBm

TOTAL RADAR= 1							
#-----#							
TXS-SIMEPAR	-50.361	-25.505	1016.0	2012-10-31_18:00:00	148875	19	
#-----#							
FM-128 RADAR	2012-10-31_18:00:00	-25.449	-50.361	1016.0	13		
1072.8	-4.720	0	1.000	13.000	0	1.300	
1127.4	-4.090	0	1.000	25.500	0	2.550	
1181.9	-4.410	0	1.000	25.500	0	2.550	
1236.4	-4.720	0	1.000	20.500	0	2.050	
1345.4	-5.980	0	1.000	12.500	0	1.250	
1454.3	-5.040	0	1.000	12.000	0	1.200	
1563.0	-3.460	0	1.000	24.500	0	2.450	
1725.8	-4.090	0	1.000	13.500	0	1.350	
1888.1	-1.890	0	1.000	12.500	0	1.250	
2103.5	-4.410	0	1.000	25.000	0	2.500	
2317.6	-3.150	0	1.000	26.000	0	2.600	
2949.4	-3.780	0	1.000	22.500	0	2.250	
0.0	-888888.000	-88	-888888.000	-888888.000	-88	-888888.000	
FM-128 RADAR	2012-10-31_18:00:00	-25.436	-50.361	1016.0	4		
1290.0	-3.150	0	1.000	18.000	0	1.800	
1425.1	-4.090	0	1.000	16.000	0	1.600	
1560.1	-3.780	0	1.000	18.000	0	1.800	
0.0	-888888.000	-88	-888888.000	-888888.000	-88	-888888.000	

Figura 3.5: Exemplo de arquivo com dados do radar para a entrada do WRFDA com dois *records*. Cabeçalho em vermelho, e em verde os cabeçalhos e rodapés dos *records*

que o radar consegue medir sem ambiguidades é proporcional ao comprimento de onda e à frequência dos pulsos do radar. O raio máximo de cobertura do radar também é proporcional à frequência de repetição dos pulsos do radar. Assim, os radares banda-S (frequência nominal entre 2-4GHz e comprimento de onda nominal entre 8-15cm) são mais úteis para a operação meteorológica. O “dilema Doppler”, que consiste em equilibrar o raio máximo e a velocidade máxima alterando a frequência de repetição dos pulsos, é responsabilidade do operador do Radar (RINEHART, 2004).

A cobertura do radar é mostrada na figura 3.1. As tarefas antes de abril de 2013 tinham um alcance de 200km e após, passou a ser de 240km.

Diferentemente dos dados de estações meteorológicas, as informações do radar não passam pelo OBSPROC. Todos os controles de qualidade são responsabilidade do usuário. A formatação do arquivo do radar é própria para o WRFDA e pode ser vista na figura 3.5.

Um dos pontos mais difíceis foi determinar o erro associado à medida. Foi suposto, para efeitos da avaliação do impacto da assimilação, que o erro não fosse maior que 10% do valor do pixel. Essa suposição é congruente com a discussão de Rinehart (2004) em seu Apêndice B. Outra metodologia usualmente adotada é usar o desvio padrão dos pixels adjacentes, como no trabalho de Vendrasco, Herdies e Angelis (2012).

3.3 WRFDA

O WRFDA é um sistema de assimilação de dados de uso livre e mantido pelo NCAR. Basicamente é composto das seguintes partes: o OBSPROC que é responsável por fazer o pré-processamento das observações como já mencionado; o “*generate background error*”(gen_be) que gera a matriz com a covariância do erro do *background* com base em uma série de previsões pelo método NMC; o WRFDA propriamente dito que combina as observações com o *background* através da minimização de uma função custo; e o “*Update Boundary Conditions*”(UPDATE_BC) que atualiza as condições de contorno (atualiza o wrfbdy_d01 gerado pelo real.exe). Com ele é possível fazer a assimilação tanto pelo 3D-VAR quanto pelo 4D-VAR.

A figura 3.6 mostra esquematicamente os diversos componentes do WRFDA e suas relações com as observações e o WRF. Nela percebemos como as diferentes fontes de dados entram na assimilação, o ciclo descrito é chamado de “começo frio”, pois coincide com o início da integração do modelo. Quando utilizada a previsão de um modelo já em execução é dito um “começo quente”, apesar de conhecido os efeitos positivos deste sobre a diminuição do efeito dos ajustes físicos do modelo (*spinup*), não foi utilizado nestes experimentos devido à falta de familiaridade com o mesmo.

Primeiramente foi preciso gerar a matriz com a covariância do erro do *background*. Para isso foram feitas duas execuções de 24h do modelo nos horários das 00 e 12UTC durante todo o mês de outubro de 2013. A escolha do mês teve como base a grande variabilidade de eventos que ocorreram e a escolha dos horários visava as diferenças devido ao ciclo diurno. Idealmente para cada caso deveria ser calculada uma matriz B , mas o custo computacional e de tempo seria excessivo em relação ao disponível. Em posse das saídas foi usado o programa gen_be disponível junto com o WRFDA para gerar a matriz de covariâncias.

Os dados das estações foram processados com o OBSPROC, também disponível com o WRFDA, que cria as matrizes necessárias para a assimilação. Os dados do radar de Teixeira Soares foram pré processados com uma rotina computacional, limitando os valores de entrada em um mínimo de 10dBz com intuito de evitar possíveis ruídos.

O WRFDA foi executado com dois conjuntos de parametrização de entrada (namelist) diferentes, o primeiro com as opções padrão disponíveis e o segundo diminuindo pela metade o raio de influência do dado assim como a variação em relação ao erro do background tolerado.

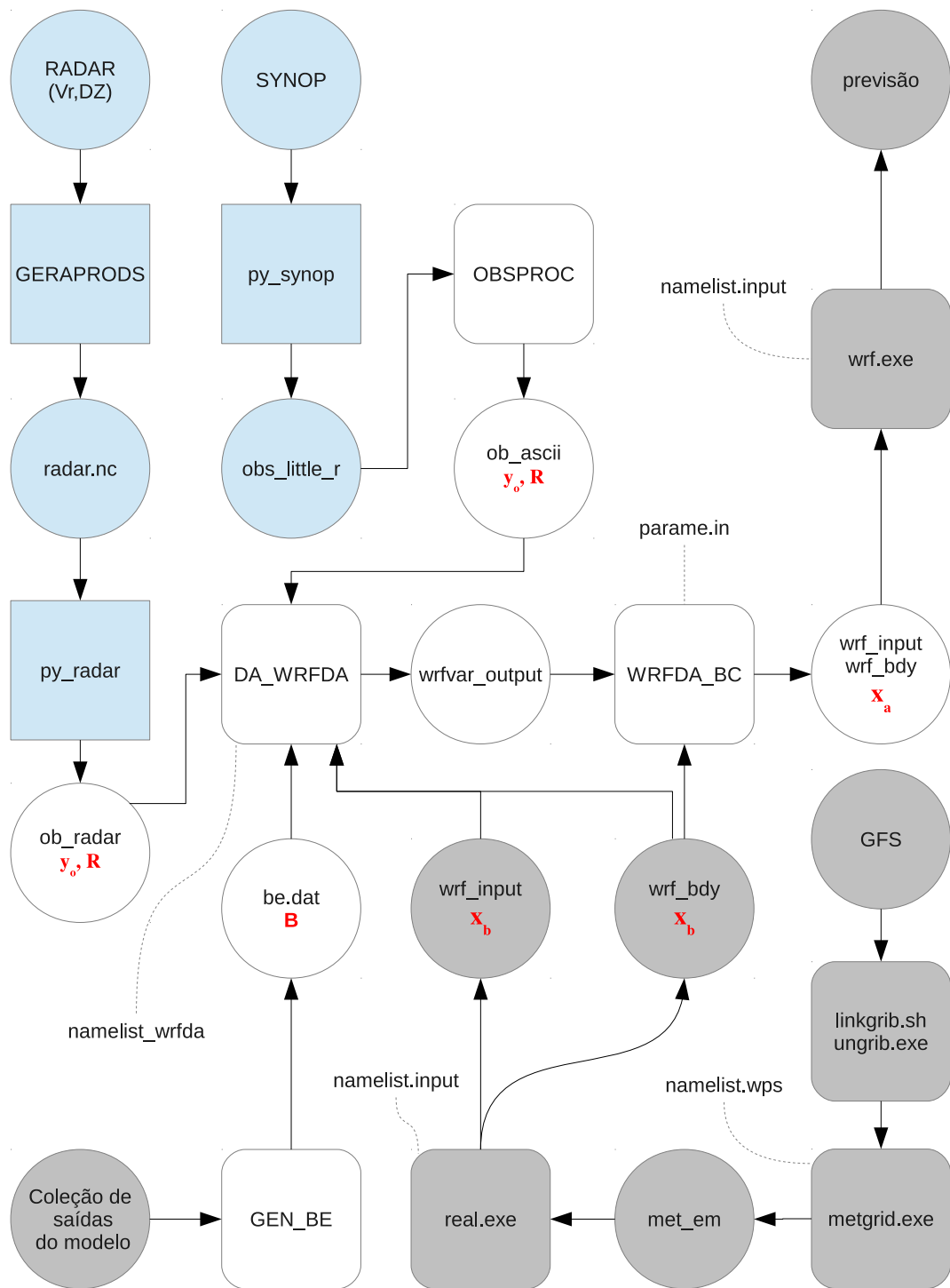


Figura 3.6: Esquema da relação entre os dados (círculos) e os algoritmos (quadrados) do sistema. A cor branca representa os elementos que compõem o pacote WRFDA, as cinzas o modelo e as azuis os elementos externos aos dois. Os termos em vermelho são os correspondentes à função custo. Os elementos ligados por linha pontilhada são arquivos de configurações.

Foram feitas três simulações numéricas diferentes segunda a Tabela 3.3. O primeiro experimento foi o de controle e não contava com nenhum tipo de assimilação. O segundo fazia a assimilação de todos os dados disponíveis e sem nenhuma alteração nas opções de configuração. Na última simulação foram reduzidos à metade os valores dos parâmetros que controlam a tolerância em relação ao erro do background, tanto em magnitude quanto em distribuição espacial. Essas modificações do último experimento tinham como objetivo tornar a assimilação mais restrita ao dados, por outro lado algumas estruturas mais detalhadas são suavizadas junto com os ruídos filtrados.

Tabela 3.3: Simulações numéricas realizadas

experimento	descrição
semDA	- Sem assimilação de dados.
DAv1	- Assimilação de dados de estações e radar.
DAv2	- Mesmo que o anterior, porém mais restrito às diferenças em relação ao erro e com raio de influência menor.

3.4 RMSE e FSS

Para examinar a qualidade das previsões foram utilizadas duas metodologias diferentes. A primeira é a raiz do erro médio quadrático (da sigla em inglês RMSE), dada pela equação 3.1 e nos dá uma noção do erro em cada ponto de grade. Ela é uma boa medida para avaliar os erros com relação às amplitudes dos fenômenos, mas possui a característica de ser muito sensível aos erros de fase.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^n (y_p - x_{f,p})^2}{n}} \quad (3.1)$$

onde y_p é a observação no ponto p , $x_{f,p}$ é a previsão no ponto p e n é o número de pontos de grade.

A segunda é o “*Fractional Skill Score*” (FSS) . Como dito o RMSE cria uma medida da performace do modelo muito dependente do ponto da medida, para eventos com pequena diferença de fase entre a previsão e o observado ele não é capaz de reconhecer se a previsão possui uma informação útil ou não. O FSS por sua vez calcula frações para pequenas áreas e faz a comparação dessas frações (ROBERTS, 2008). A Figura 3.7 mostra esquematicamente duas áreas para serem comparadas, uma com a previsão e outra com o dado de radar. Se atentarmos para o acerto em cada ponto verificaremos que a previsão não teve acertos, mas ao olharmos para a área como um todo percebemos que em ambos a fração foi 6/25 e portanto a previsão seria ótima segundo o índice FSS.

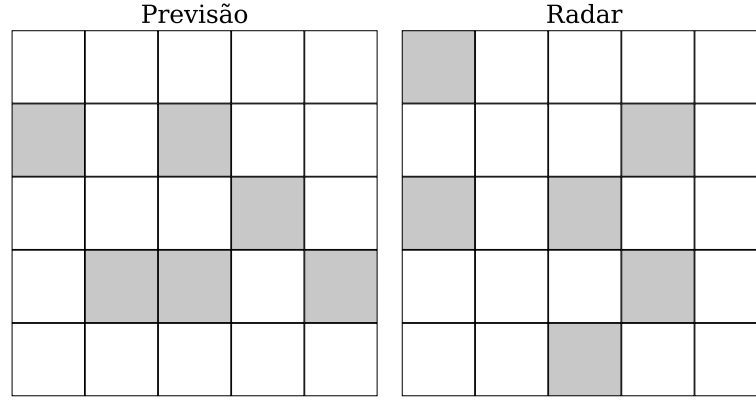


Figura 3.7: Comparação esquemática entre previsão e radar. Adaptado de (ROBERTS, 2008)

Para calcular o FSS é preciso determinar antes em quais pontos de grade a medida ultrapassou um determinado limiar, neste trabalho foi utilizado 30dBz. O FSS é uma variação do “*Brier Skill Score*” (ROBERTS; LEAN, 2008), que em forma de frações é denominado “Fractions Brier Score” (FBS)

$$FSS = 1 - \frac{FBS}{FBS_{worst}} \quad (3.2)$$

e é definido pela equação 3.3.

$$FBS = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (F_f - F_r)^2 \quad (3.3)$$

Onde F_f e F_r são, respectivamente, as frações da previsão e do radar em cada ponto j , e N é o número de pontos dentro da área verificada. Neste trabalho foram usadas áreas de $15km^2$. O FBS_{worst} é o pior FBS possível, dado pela equação 3.4.

$$FBS_{worst} = \frac{1}{N} \left[\sum_{j=1}^N F_f^2 + \sum_{j=1}^N F_r^2 \right] \quad (3.4)$$

4 Análises

4.1 Caso 31-Out-2012 18UTC

Nesse dia o estado do Paraná foi influenciado por um centro de baixa pressão a oeste, presente no Paraguai, e a leste por um ciclone extratropical. A atmosfera aquecida também era um fator favorável à formação de convecção. Nas áreas entre o Paraguai e o Paraná, a atmosfera estava altamente instável com valores de CAPE acima de $3300 J/kg$ (figura 4.1).

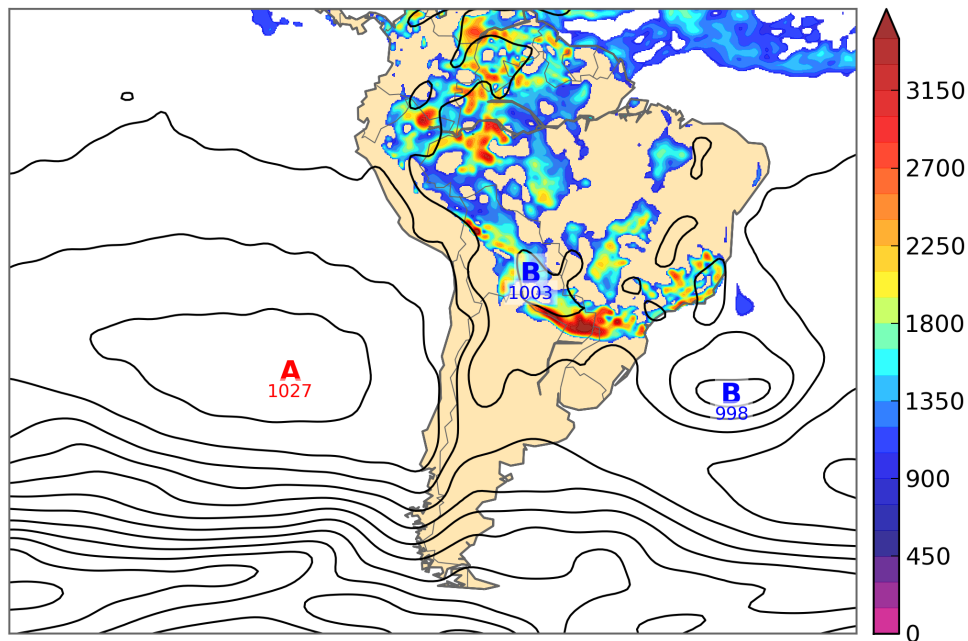


Figura 4.1: Pressão ao Nível Médio do Mar e CAPE acima de $1000 [J/kg]$ para o dia 31-Out-2012 às 18h00UTC. Campo extraído do modelo GFS.

Na área da Região Metropolitana de Curitiba/PR (RMC) a presença de uma linha de instabilidade provocou fortes rajadas de vento, esta por sua vez associada ao ciclone extratropical já citado. Na região Oeste do Paraná observa-se a formação de um Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM) associado à baixa pressão presente no Paraguai (figura

4.2). Neste estudo analisamos a porção leste por estar na área de abrangência do radar de Teixeira Soares.

As integrações numéricas efetuadas eram de 6h à frente, portanto a análise das 18UTC foi escolhida para fazer a inicialização e a assimilação, assim o caso corresponde a 1h30min de previsão.

Para a análise haviam 46 estações meteorológicas e 353875 medidas do radar disponíveis, na tabela 4.1 é possível ver a quantidade de dados assimilados por variável.

Tabela 4.1: Dados assimilados por variável para o dia 31-Out-2012

Variável	Qtd Dados Assimilados
Veno zonal	31
Vento meridional	32
Temperatura	37
Razão de mistura de vapor	19
Pressão	37
Refletividade	262225
Velocidade Radial	237826

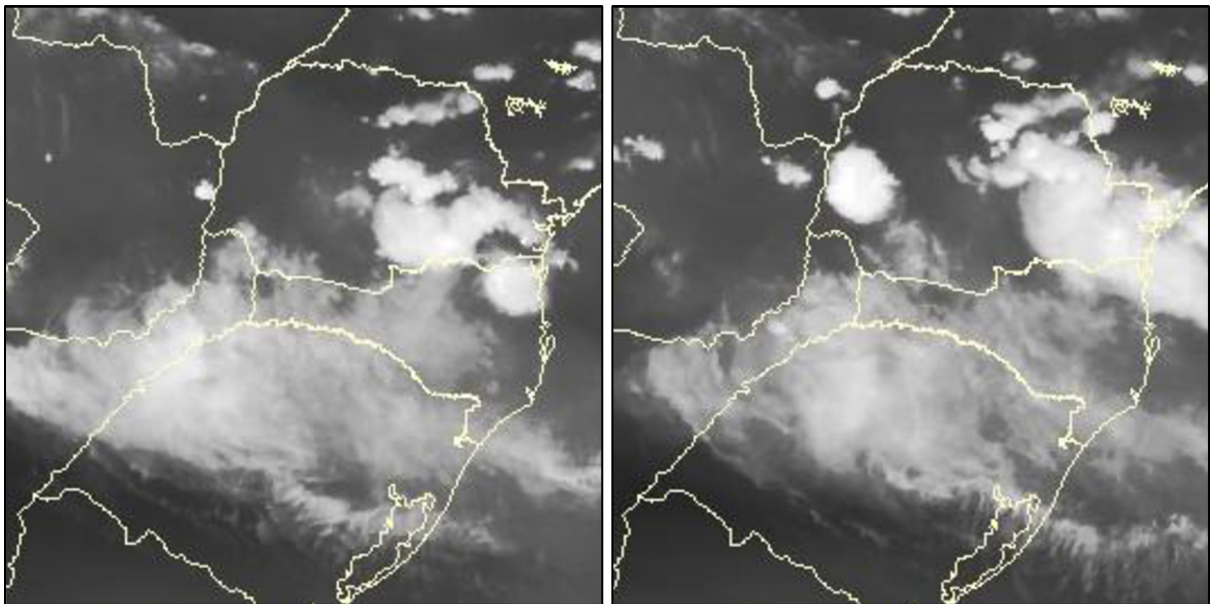


Figura 4.2: Canal vapor d'água medido pelo satélite GOES-12 para as 18h00UTC (esquerda) e 19h30UTC (direita) do dia 31-Out-2012. Fonte: CPTEC/INPE

Uma comparação entre a máxima refletividade prevista e a observada é mostrada na figura 4.3. Os dados do radar mostram um sistema se propagando para leste. O prognóstico sem assimilação de dados apresentou refletividade apenas a partir da primeira

hora e em forma de pequenos núcleos esparsos. A assimilação pelo primeiro esquema (DAv1) superestimou a medida em quase toda a área, mas foi mais congruente com a realidade do que sem a assimilação. O esquema de assimilação com restrições (DAv2) apresentou núcleos mais próximos aos reais, mas ainda errando em intensidade.

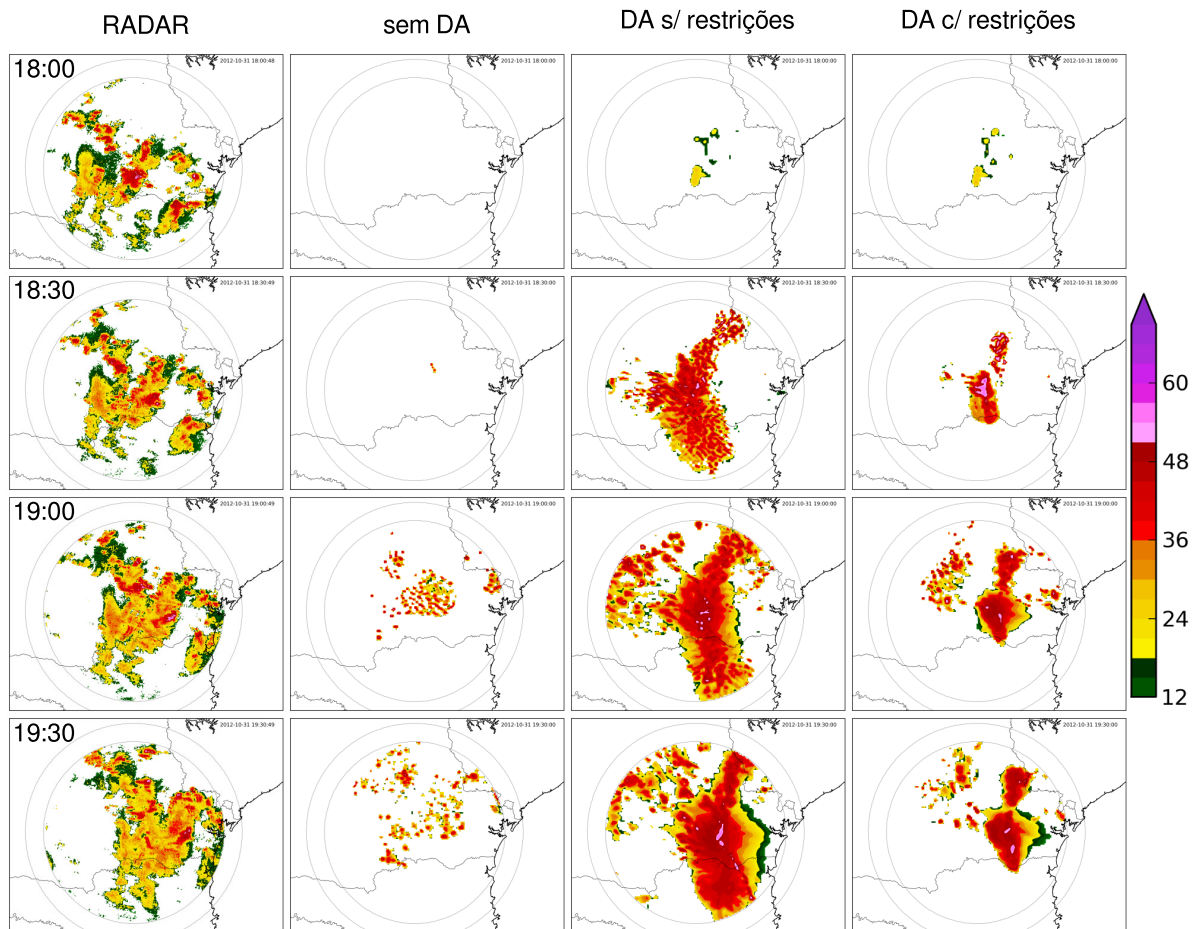


Figura 4.3: Comparação entre máxima refletividade do radar com a previsão nos diferentes esquemas de assimilação entre as 18h00UTC e 19h30UTC do dia 31/10/2012. Primeira coluna: dados observados pelo radar de Teixeira Soares. Segunda coluna: previsão de controle sem assimilação de dados. Terceira coluna: previsão com o primeiro esquema de assimilação sem restrições nos dados. Quarta coluna: previsão com assimilação, mais restrito aos erros e com raio de influência menor.

O índice (Fractional Skill Score) FSS e o RMSE foram calculados, para uma avaliação quantitativa dos resultados, e apresentados na figura 4.4. Percebe-se uma melhora dos dois esquemas de assimilação em relação à previsão de controle nas três primeiras horas. O FSS indicou um melhor posicionamento dos núcleos no segundo esquema de assimilação, enquanto o RMSE indica que a amplitude foi melhor representada no primeiro esquema.

Comparando assimilação pelo segundo esquema com o Titan (figura 4.5) é possível

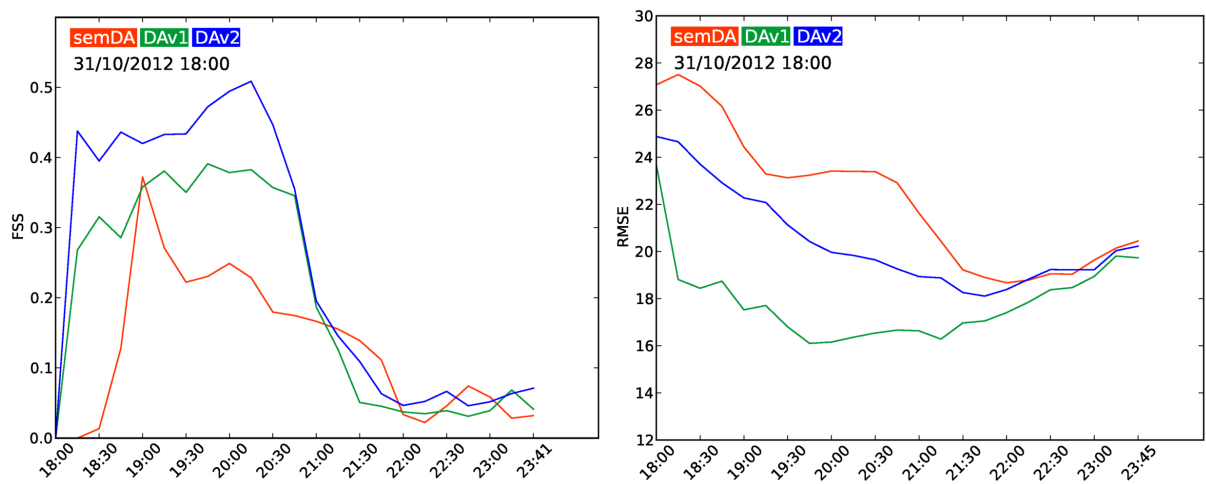


Figura 4.4: Índice FSS (esquerda) e RMSE (direita), calculados para 6h de previsão do dia 31-Out-2012. Curva vermelha sem assimilação de dados, verde representa primeiro esquema de assimilação e azul o segundo esquema de assimilação.

observar que os dois apresentaram erro de fase, mas o WRF superestimou a área com refletividade maior do que 35dBz. Vale lembrar que o TITAN foi iniciado às 18h30, meia hora após o modelo, porque sua previsão é de apenas 1h.

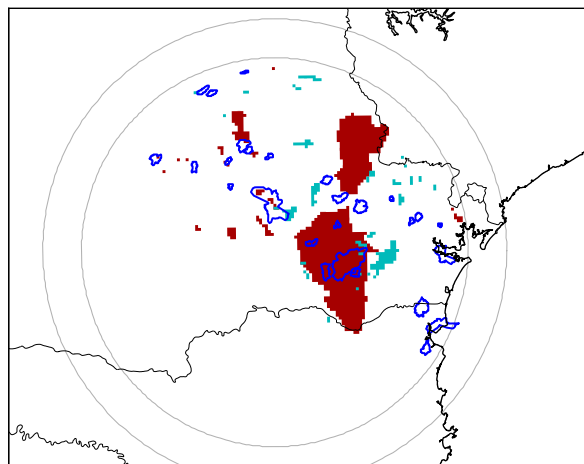


Figura 4.5: Comparação entre o esquema com maior FSS e o TITAN para o dia 31-Out-2012 às 19:30UTC. Núcleos acima de 35dBz. Em verde os medidos pelo radar, em vermelho o previsto pelo modelo no esquema DAv2 e em azul o nowcasting feito com o TITAN.

Nas estimativas de precipitação na figura 4.6 é possível ver com mais clareza como o segundo esquema de assimilação contribuiria na previsão de curto prazo para este caso em particular.

Para perceber as diferenças entre os métodos de assimilação utilizaram-se três

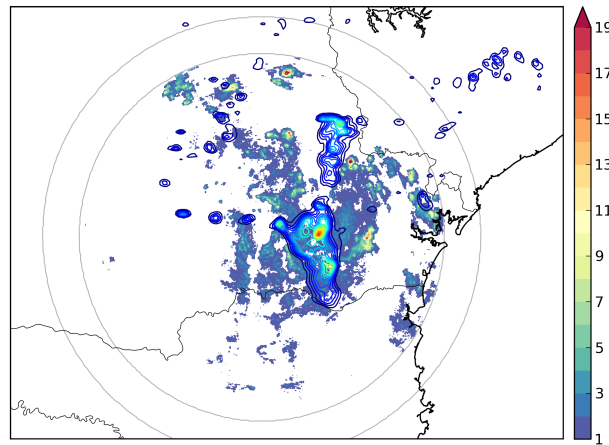


Figura 4.6: Estimativa de precipitação por radar (preenchido) e previsto pelo modelo (contornos) para o dia 31-Out-2012 às 19:30UTC.

variáveis: razão de mistura de vapor d'água (QVAPOR), razão de mistura de água de chuva (QRAIN) e velocidade vertical do vento (W). Além da distribuição delas no nível mais próximo à superfície, também foram feitas duas seções, uma zonal e outra meridional, com os perfis verticais. O ponto de intersecção é definido pelas coordenadas: $latitude = -25.48$ e $longitude = -50.2$.

As diferenças entre a quantidade de vapor de água no momento da análise são evidentes nos perfis verticais (figuras 4.8 e 4.9), adicionando mais umidade acima dos 2.5km próximo ao ponto de cruzamento entre os planos. Em superfície (figura 4.7) as diferenças no campo da análise são menores.

Como esperado a análise produzida pelo esquema DAv2 foi mais próxima à execução sem assimilação, mas mesmo com as restrições impostas a quantidade de umidade apresentou variações significativas ao longo de 1h30 de previsão.

Nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12 observa-se que a umidade inserida na análise é convertida em chuva gerando grandes diferenças desde os primeiros minutos da integração. Enquanto que sem assimilação a quantidade de água de chuva é mínima, nos esquemas com assimilação as quantidades são maiores, sendo que no segundo esquema de forma mais concentrada.

Essas diferenças na quantidade de chuva estão ligadas às diferenças nas condições propícias à formação de nuvens. Nos campos de velocidade vertical (figuras 4.13 e 4.14) vemos como nas rodadas assimiladas a componente vertical do vento era mais intensa, atuando como um mecanismo para gerar nuvens mais profundas.

Os perfis apresentados correspondem a apenas 1h30 de previsão uma vez que o

caso de interesse se encontra nesse intervalo, porém os resultados para as demais horas da previsão são semelhantes e seria redundante apresentá-los aqui.

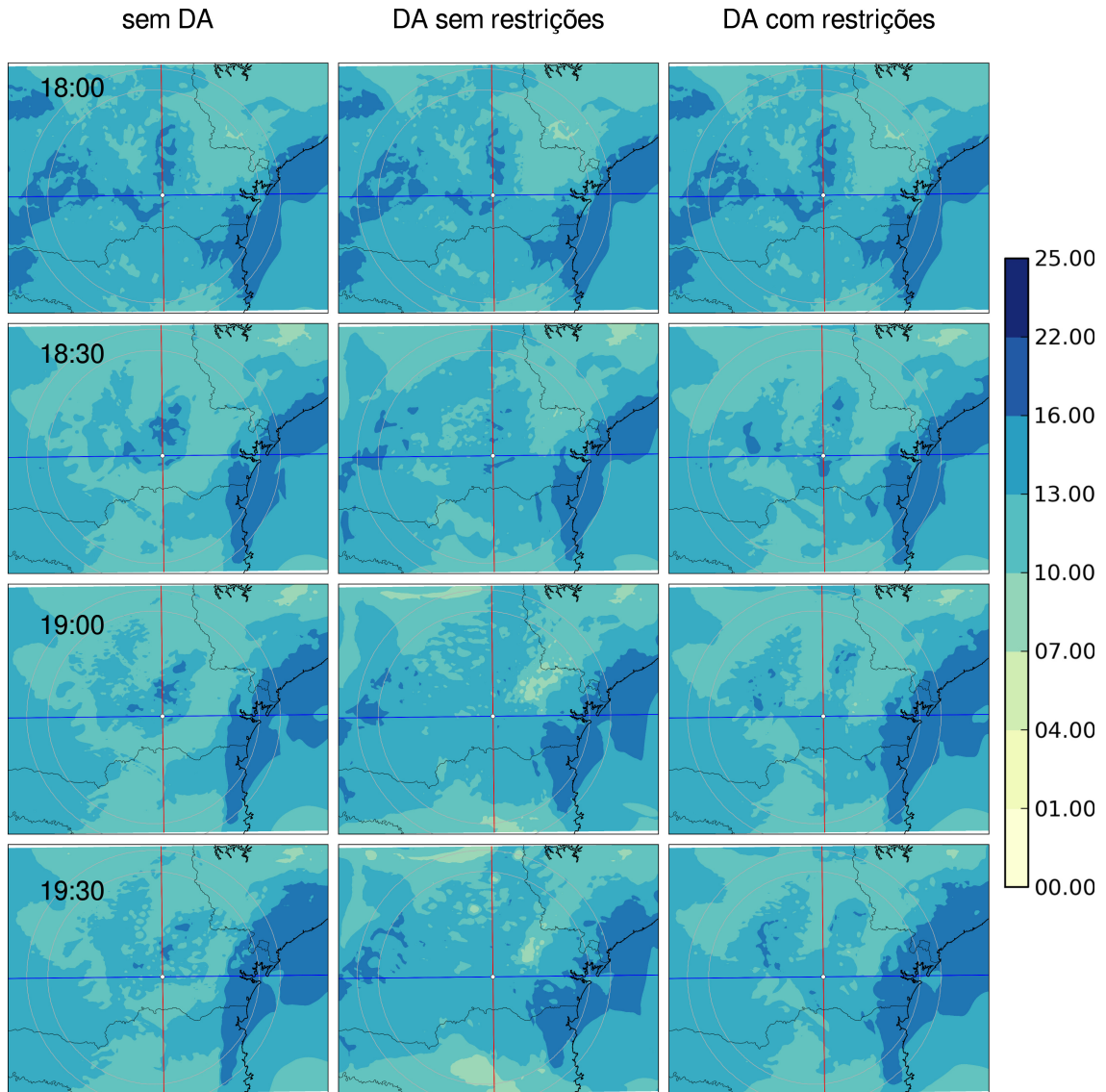


Figura 4.7: Razão de mistura de vapor d'água no nível mais próximo à superfície [kg/kg]. Linha vermelha indica a posição do plano meridional e a linha azul o plano zonal. O cruzamento dos planos se dá no ponto: $latitude = -25.48$ e $longitude = -50.2$

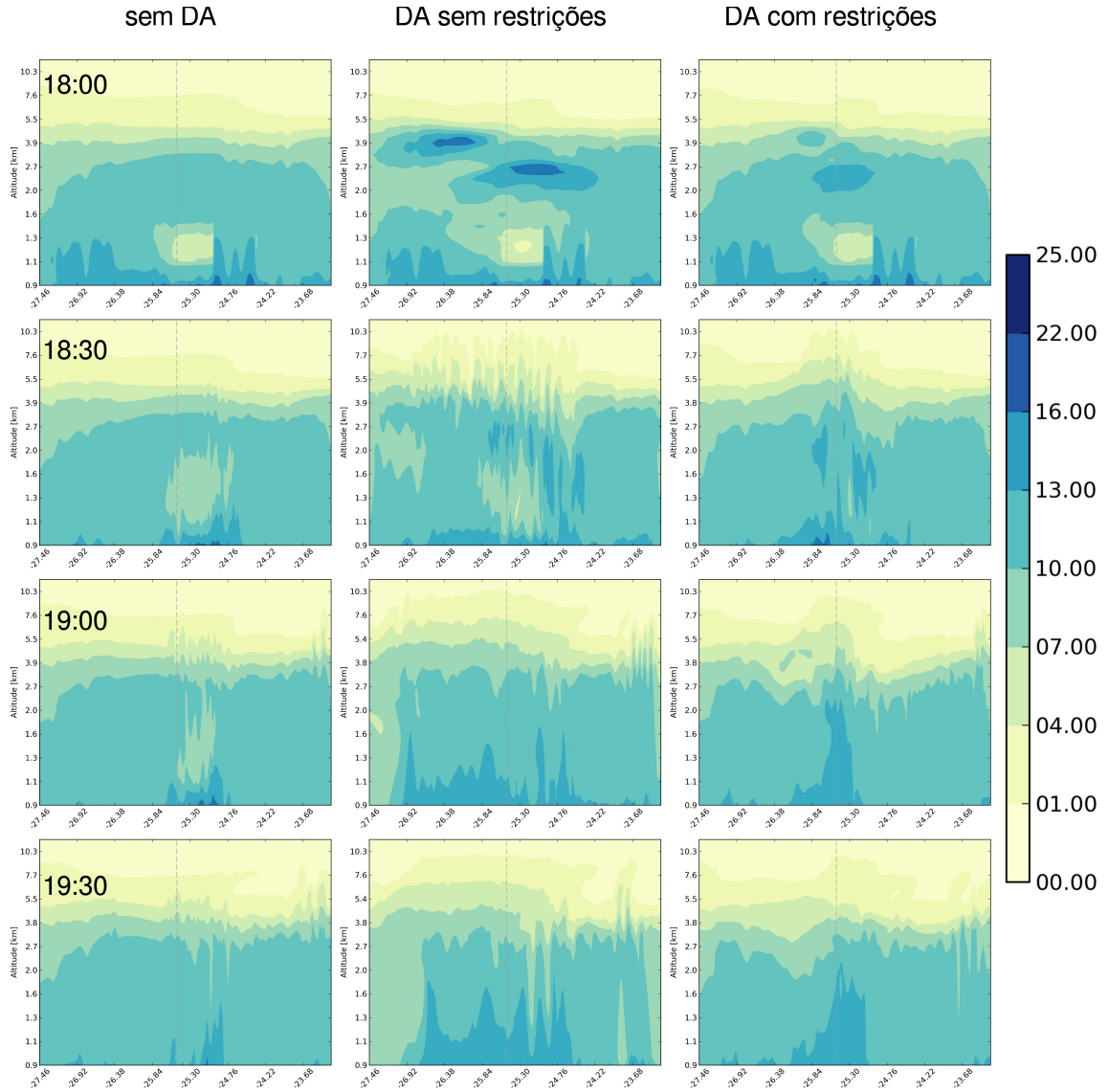


Figura 4.8: Perfil vertical meridional da razão de mistura do vapor d'água [kg/kg] correspondente à linha vermelha da figura 4.7. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal.

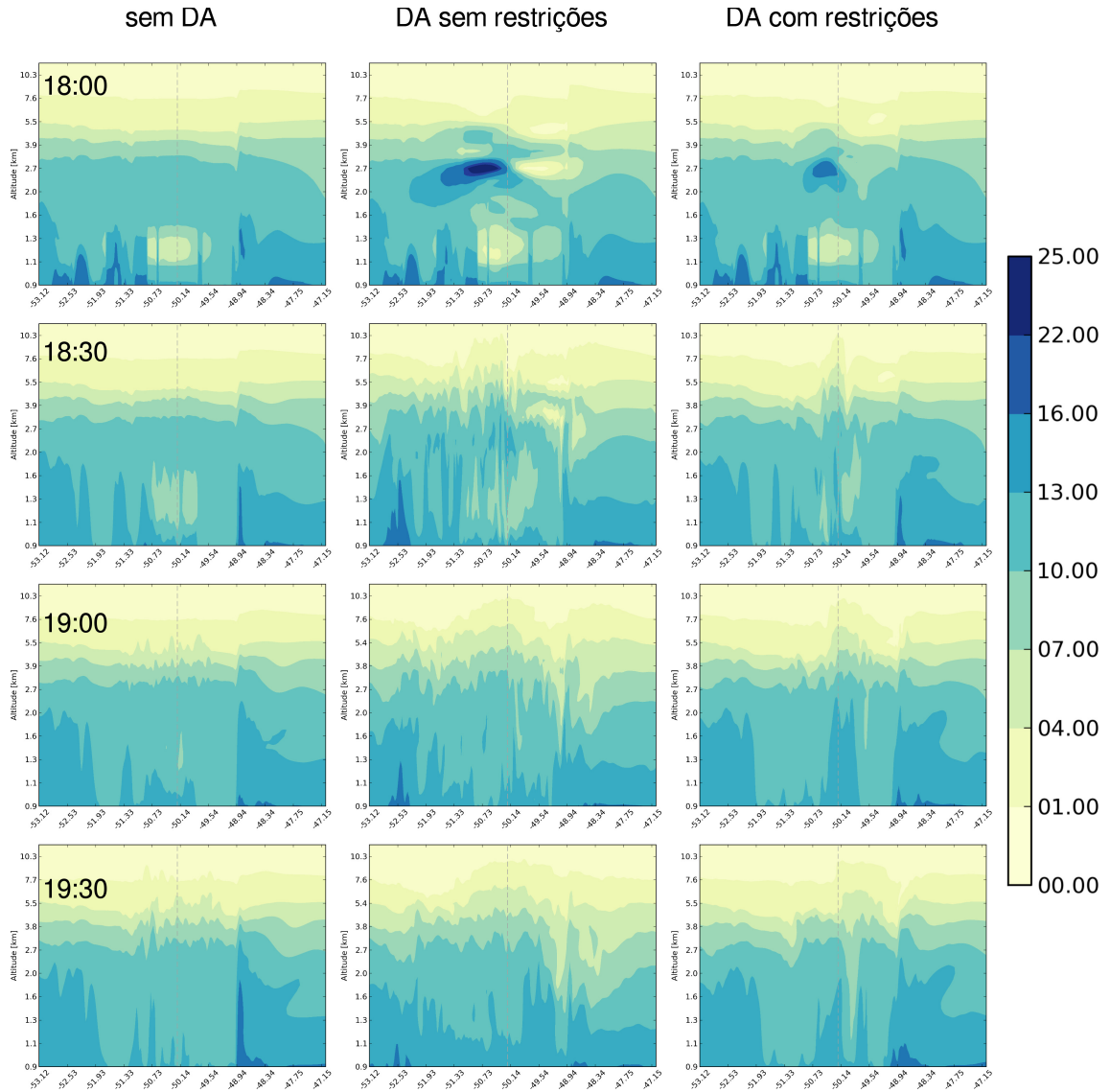


Figura 4.9: Perfil vertical zonal da razão de mistura do vapor d'água [kg/kg] correspondente à linha azul da figura 4.7. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional.

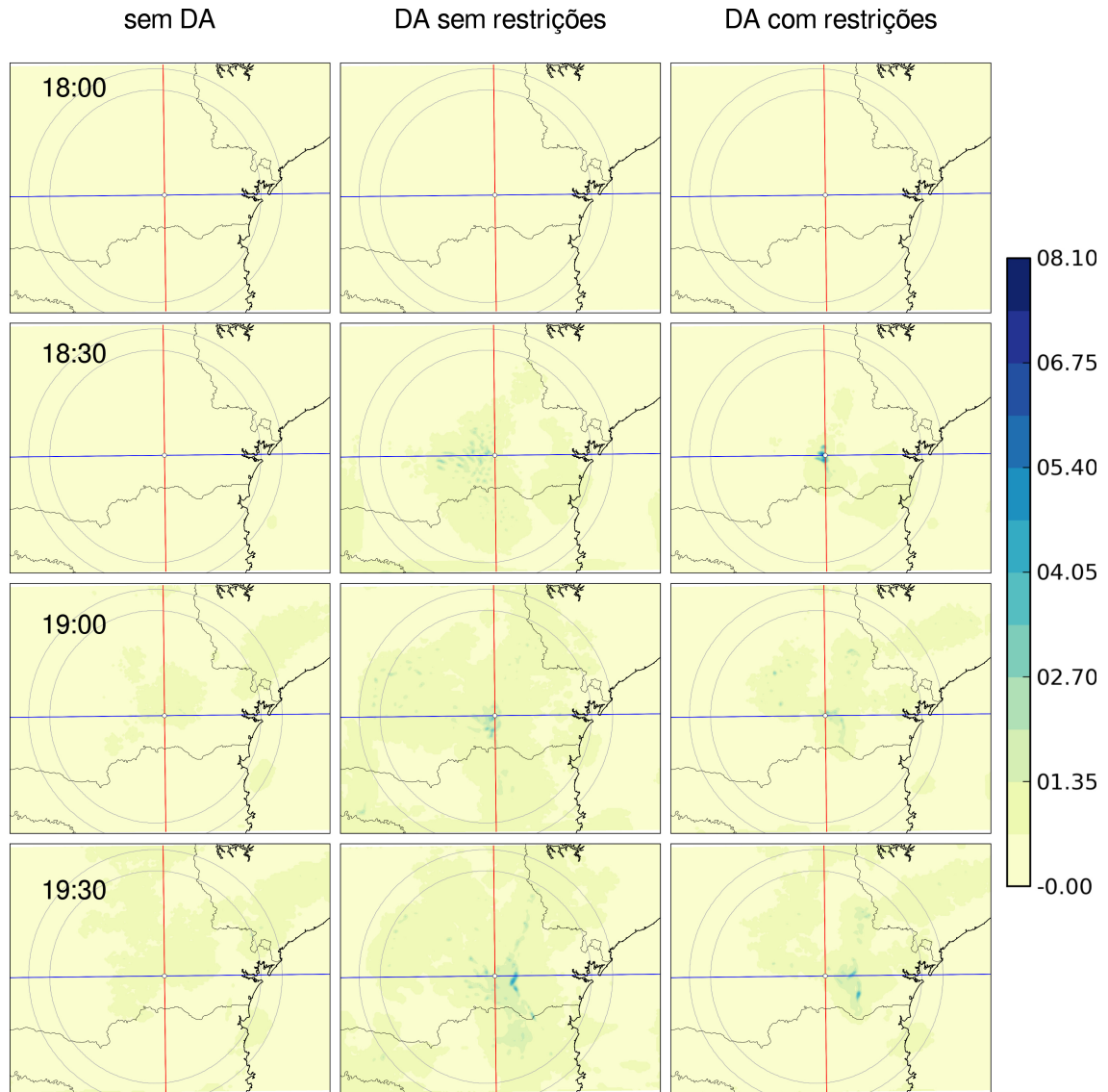


Figura 4.10: Razão de mistura de água de chuva no nível mais próximo à superfície [kg/kg]. Linha vermelha indica a posição do plano meridional e a linha azul o plano zonal. O cruzamento dos planos se dá no ponto: $latitude = -25.48$ e $longitude = -50.2$

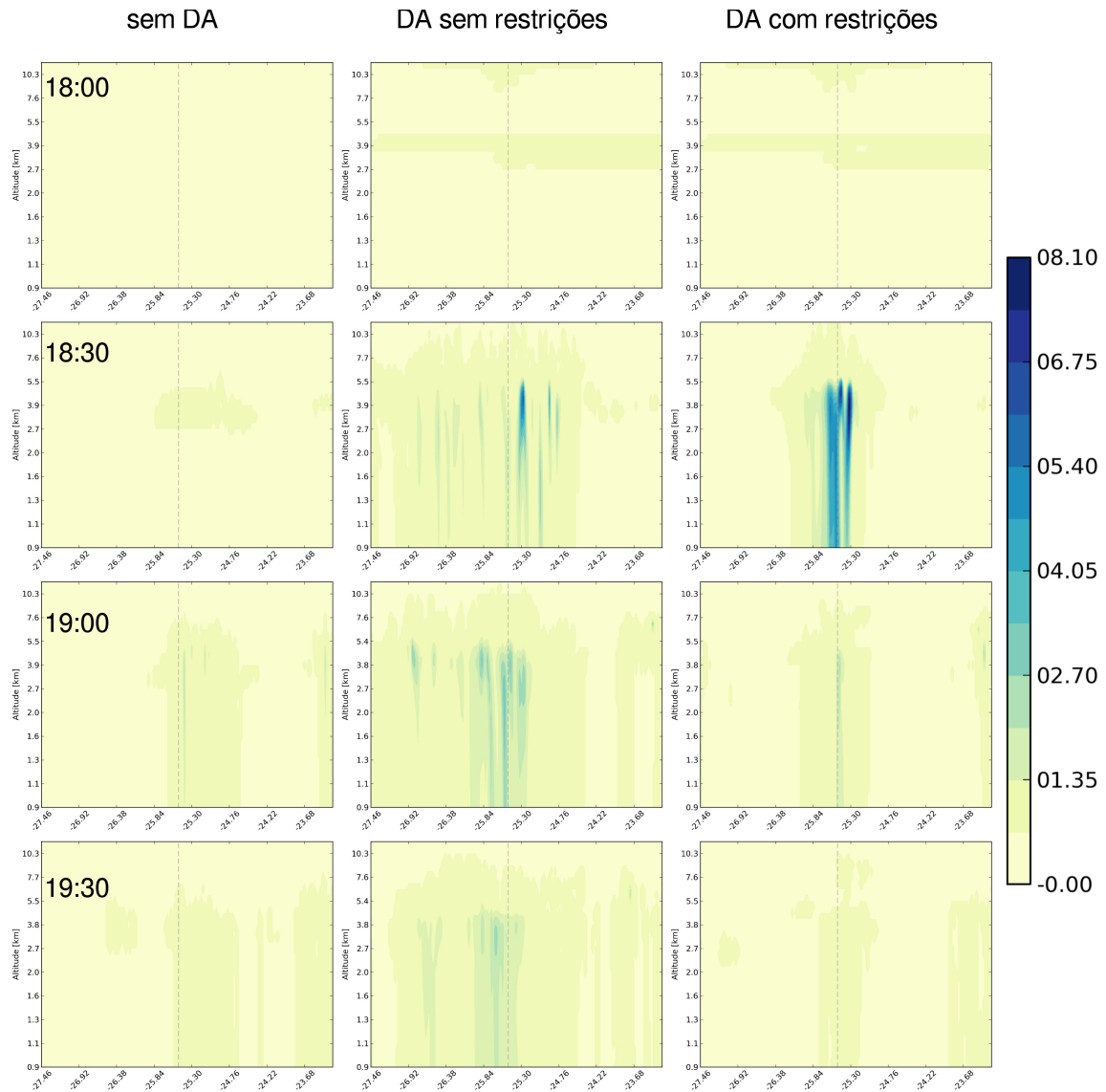


Figura 4.11: Perfil vertical meridional da razão de mistura água de chuva [kg/kg] correspondente à linha vermelha da figura 4.10. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal.

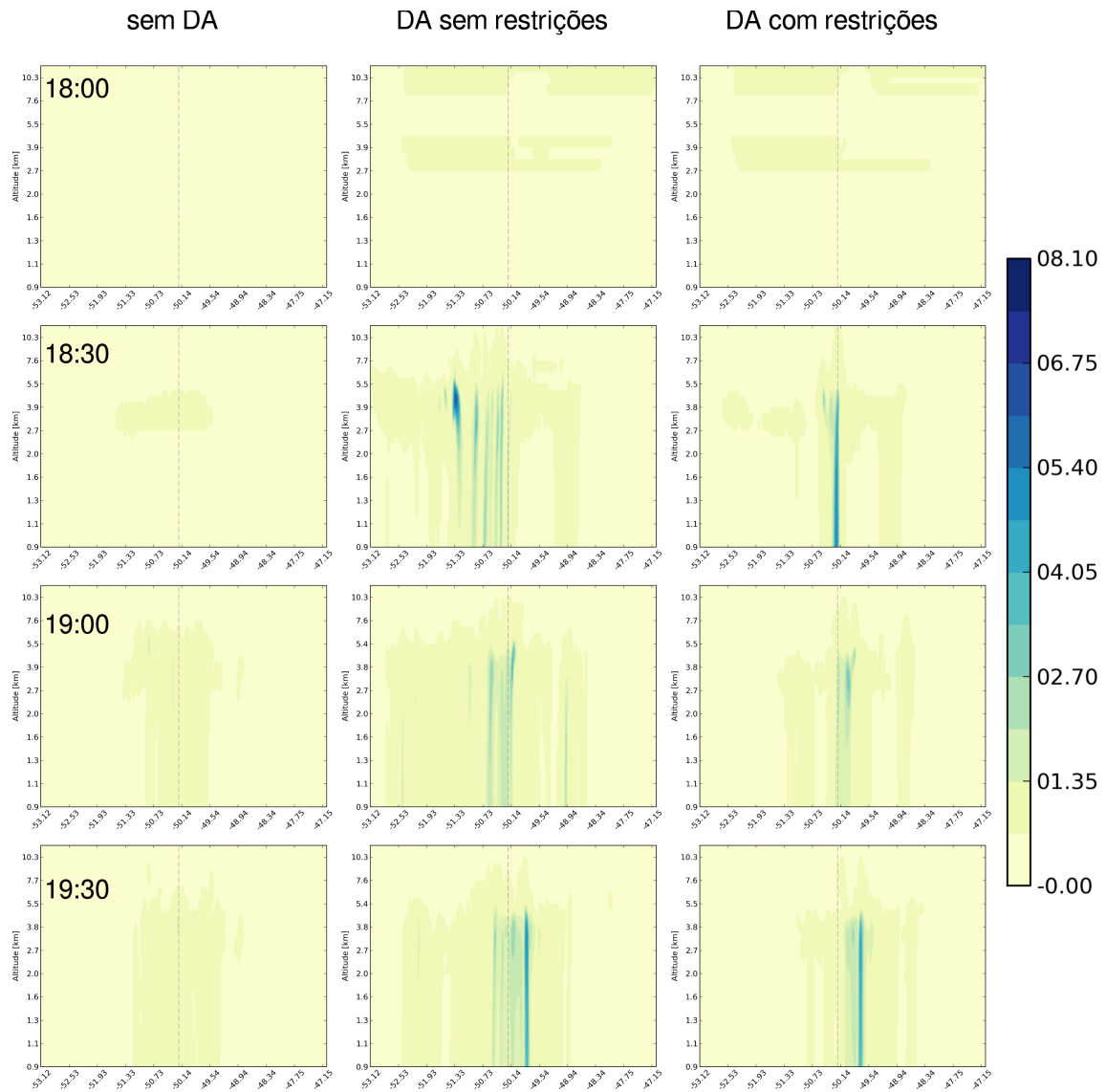


Figura 4.12: Perfil vertical zonal da razão de mistura água de chuva [kg/kg] correspondente à linha azul da figura 4.10. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional.

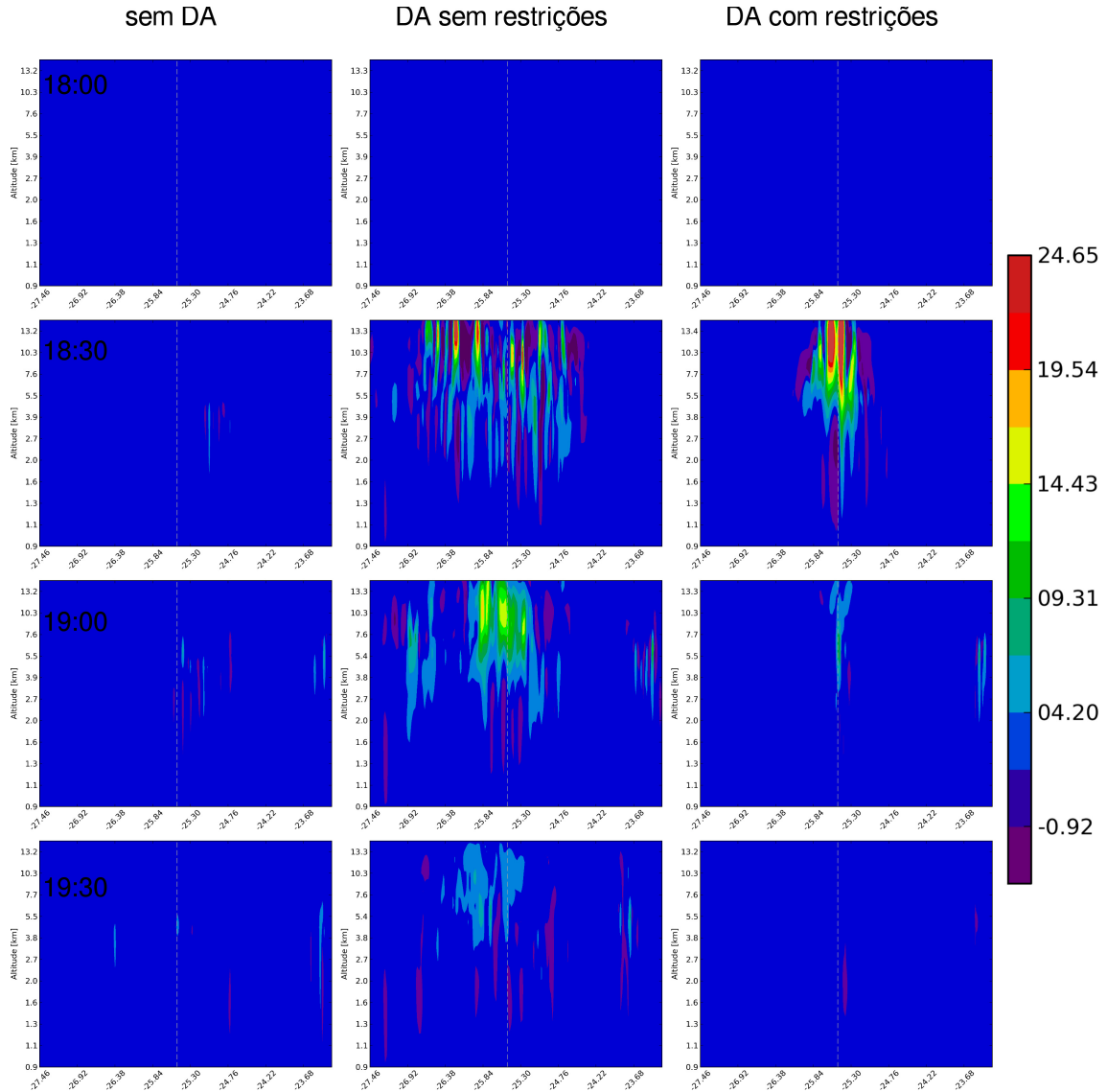


Figura 4.13: Perfil vertical meridional da velocidade vertical [m/s] correspondente à linha vermelha da figura 4.10. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal.

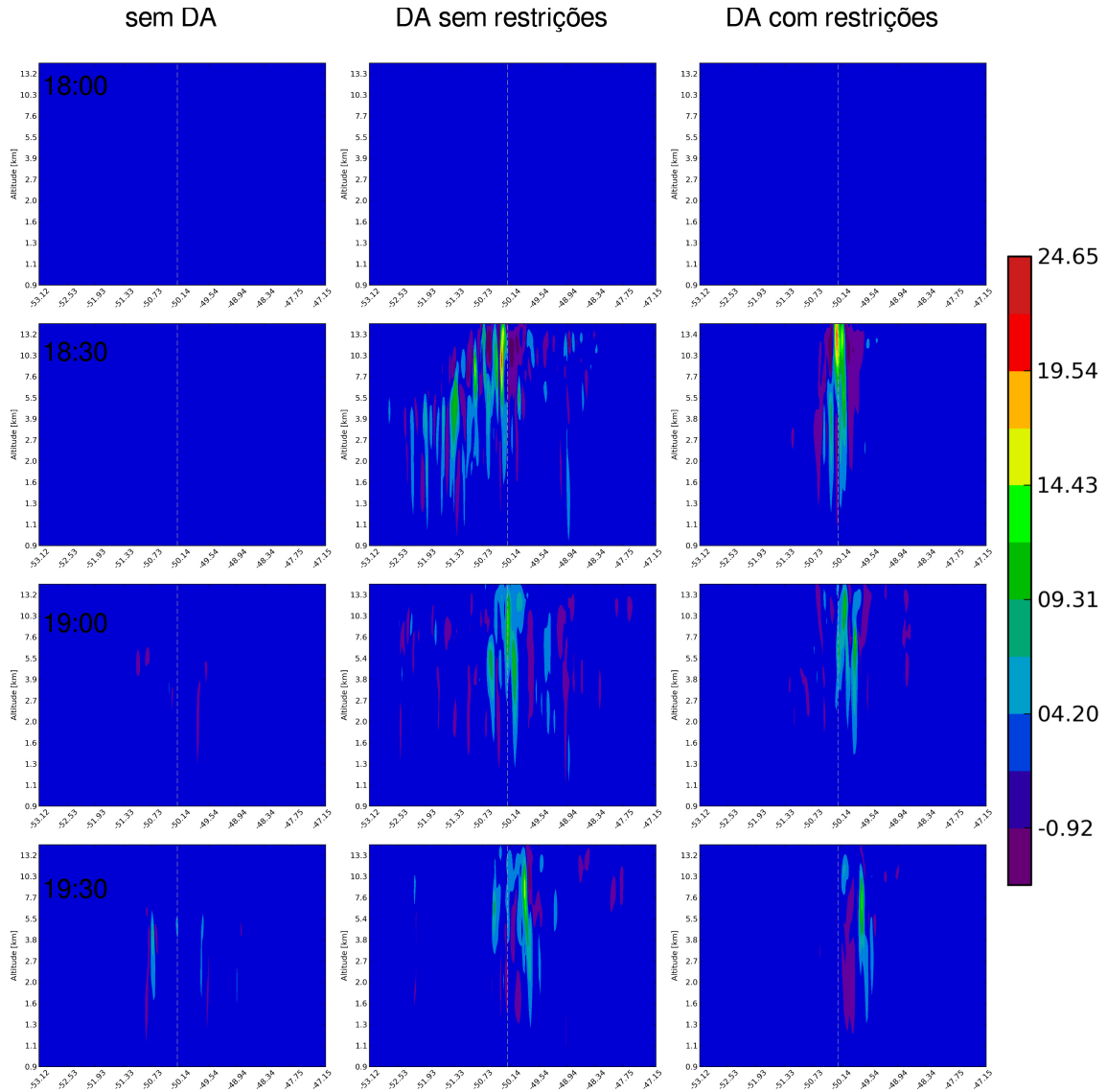


Figura 4.14: Perfil vertical zonal da razão da velocidade vertical [m/s] correspondente à linha azul da figura 4.10. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional.

4.2 Caso 21-Dez-2012 18UTC

Uma frente fria presente no Atlântico, o vento de baixos níveis oriundo do oceano e a advecção de umidade da Amazônia criaram condições favoráveis à formação de convecção no Paraná. Nas imagens de satélite (figura 4.16) pode-se observar a ocorrência de um sistema convectivo no litoral paranaense.

No leste do estado do Paraná haviam núcleos de CAPE acima de 2250 J/kg fornecendo uma grande quantidade de energia para a formação de convecção.

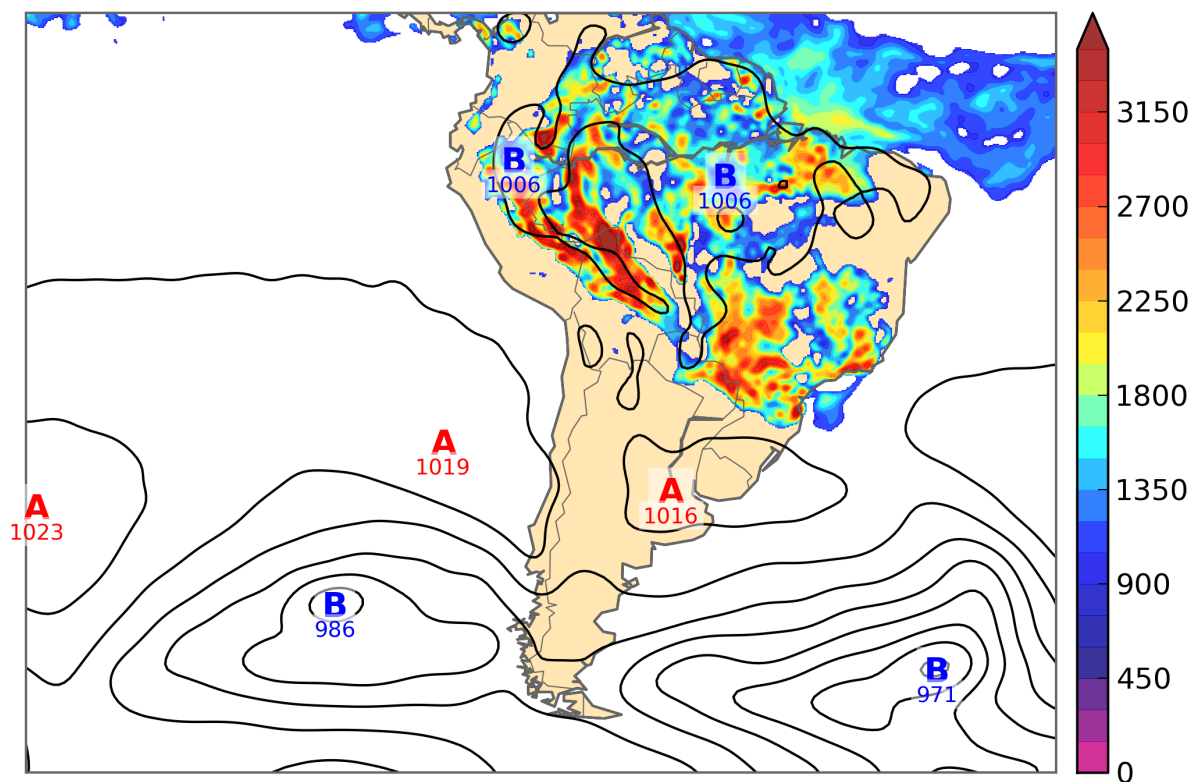


Figura 4.15: Pressão ao Nível Médio do Mar e CAPE acima de 1000 [J/kg] para o dia 21-Dez-2012 às 18h00UTC. Campo extraído do modelo GFS.

A chuva acumulada em Curitiba entre as 23h e 24h desse dia foi de 19.6mm. Segundo a Copel mais de 66 mil unidades ficaram sem energia no Paraná, sendo 26 mil na RMC (PERES; TRISOTTO, 2012).

Para a análise haviam 46 estações meteorológicas e 69083 medidas do radar disponíveis, na tabela 4.2 é possível ver a quantidade de dados assimilados por variável.

Nas comparações entre a refletividade do Radar com relação às diferentes execuções dos modelos (Figura 4.17) vemos que apenas o primeiro esquema de assimilação

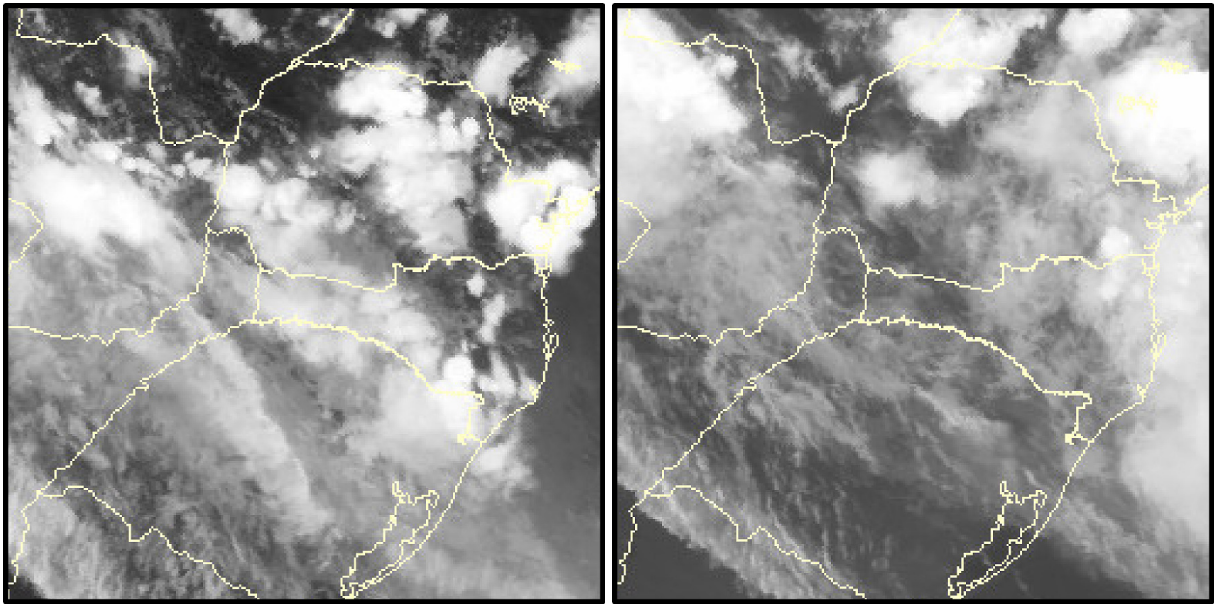


Figura 4.16: Canal 4 do infravermelho pelo satélite GOES-13 para as 18h00UTC (esquerda) e 23h00UTC (direita) do dia 21-Dez-2012. Fonte: CPTEC/INPE

Tabela 4.2: Dados assimilados por variável para o dia 21-Dez-2012

Variável	Qtd Dados Assimilados
Veno zonal	31
Vento meridional	33
Temperatura	37
Razão de mistura de vapor	18
Pressão	36
Refletividade	54846
Velocidade Radial	58428

(DAv1) foi capaz de prever o núcleo presente sobre região metropolitana de Curitiba, visto nos dados de Radar das 19h00UTC. A linha de instabilidade, bem marcada entre as 20h00 e 21h00UTC também foi melhor representada pelo esquema DAv1. A principal contribuição dos esquemas de assimilação neste caso foi a remoção da convecção presente a oeste do radar no esquema sem assimilação, no entanto alguns pontos onde a análise já superestimava as refletividades, como em Santa Catarina, persistiram apesar da assimilação. Nenhum prognóstico previu com precisão o fenômeno de interesse às 23h00UTC.

O FSS indica que o esquema DAv1 foi melhor em quase todo o período simulado e durante a última hora de previsão as duas rodadas de assimilação foram piores do que sem a assimilação. O RMSE mostra que todos os prognósticos tiveram erros semelhantes. A tendência de diminuição do erro ao longo das horas é devido ao enfraquecimento e à

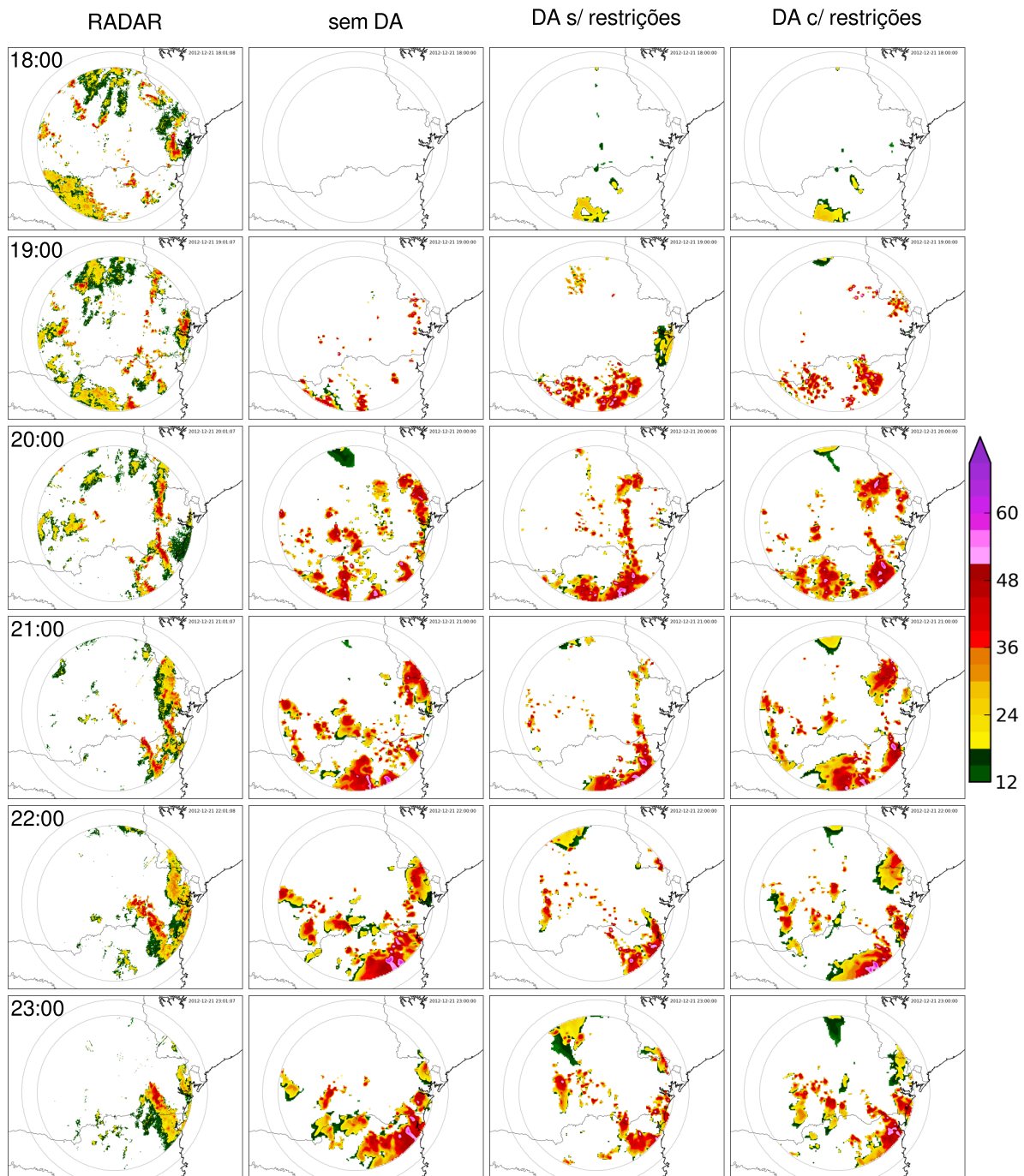


Figura 4.17: Comparação entre máxima refletividade do radar com a previsão nos diferentes esquemas de assimilação entre as 18h00UTC e 23h00UTC do dia 21/12/2012. Primeira coluna: dados observados pelo Radar de Teixeira Soares. Segunda coluna: previsão de controle sem assimilação de dados. Terceira coluna: previsão com o primeiro esquema de assimilação sem restrições nos dados. Quarta coluna: previsão com assimilação, mais restrito aos erros e com raio de influência menor.

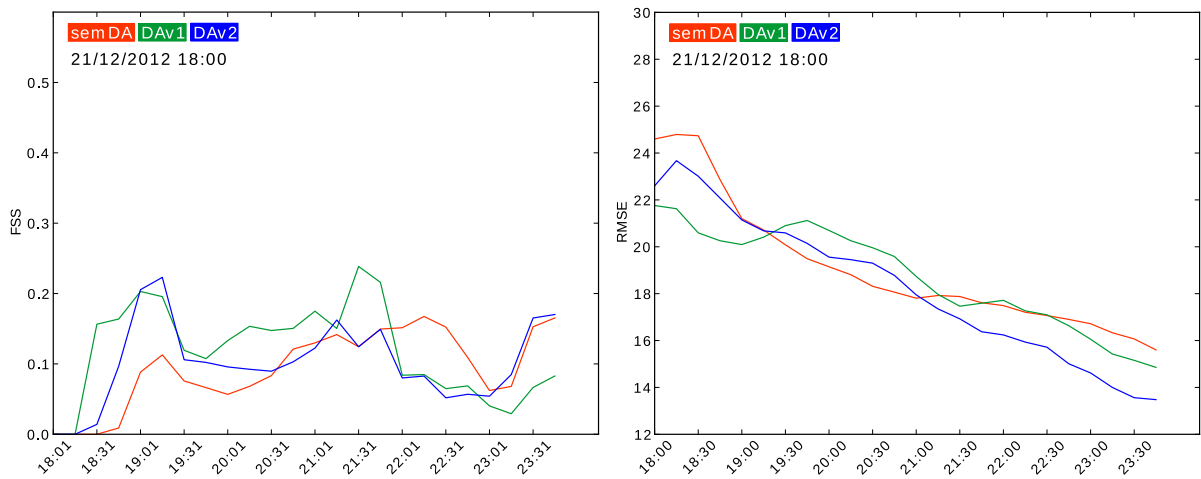


Figura 4.18: Índice FSS (esquerda) e RMSE (direita), calculados para 6h de previsão do dia 21-Dez-2012. Curva vermelha sem assimilação de dados, verde representa primeiro esquema de assimilação e azul o segundo esquema de assimilação.

propagação do sistema para fora da área do Radar.

De maneira geral o primeiro esquema de assimilação foi melhor. Um dos motivos para isso reside no fato da análise ter grande diferença com relação ao observado. Como o primeiro esquema é menos restritivo a essas diferenças mais dados foram inseridos, o que possibilitou o surgimento do núcleo sobre Curitiba.

Os núcleos acima de 35dBz previstos com o TITAN em comparação com o modelado e o observado é apresentado na Figura 4.19, percebe-se que mesmo modelos de nowcasting enfrentam dificuldades em fenômenos de desenvolvimento rápido e com pequena escala horizontal. Não é apresentada a comparação do TITAN com o modelo para o horário de interesse pois a diferença entre o tempo de prognóstico do modelo e do TITAN ser muito diferentes nesse caso, o primeiro seria de 5h enquanto o outro de apenas 1h. O modelo errou por superestimar as áreas com refletividade acima de 35dBz, o que na prática representa uma estimativa de precipitação acima do observado, como visto na Figura 4.20.

Foram traçados perfis verticais das razão de mistura de vapor d'água (QVAPOR) e de água de chuva (QRAIN) nas coordenadas: *latitude* = -25.41 e *longitude* = -49.25 . A assimilação dos dados de Radar modificaram a análise, diminuindo a quantidade de vapor de água principalmente nos níveis mais baixos (Figuras 4.21 a 4.23). Essa retirada de vapor contribuiu para suprimir a convecção à oeste do Radar presente no prognóstico sem assimilação.

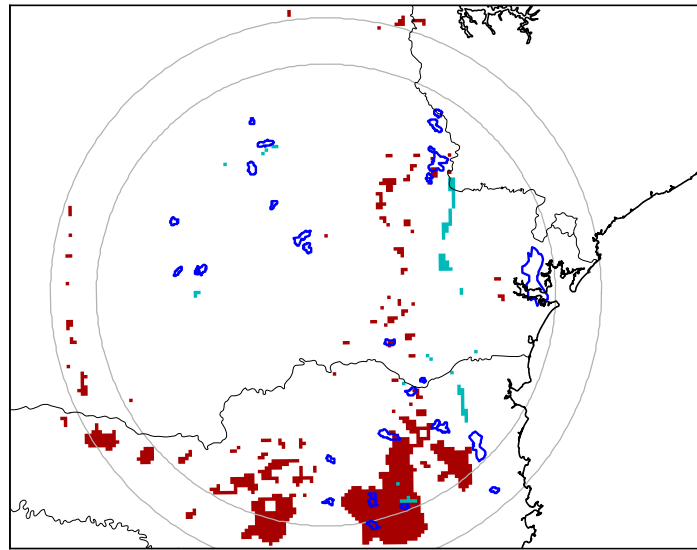


Figura 4.19: Comparação entre o esquema com maior FSS e o TITAN para o dia 21-Dez-2012 às 19:30UTC. Em verde os núcleos medidos pelo Radar, em vermelho o previsto pelo modelo no esquema DAV1 e em azul o nowcasting feito com o TITAN.

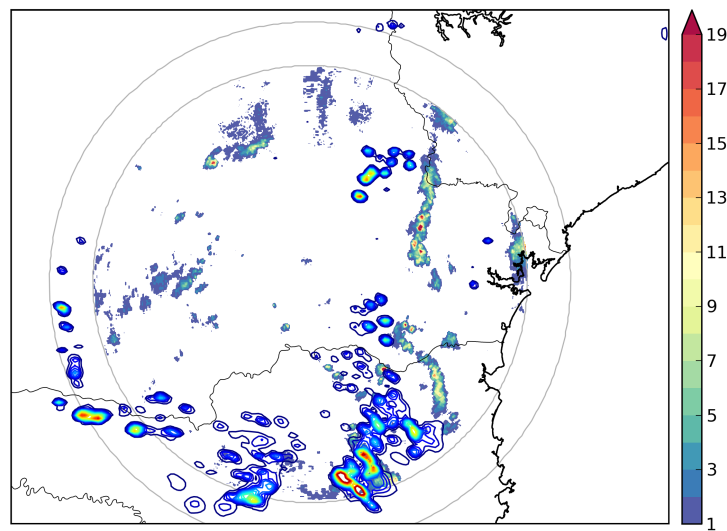


Figura 4.20: Estimativa de precipitação por Radar (preenchido) e previsto pelo modelo (contornos) para o dia 21-Out-2012 às 19:30UTC.

A razão de mistura de água de chuva prevista (Figuras 4.24 a 4.26) apresentou valores menores sobre o estado de Santa Catarina nas últimas horas de integração dos esquemas assimilados.

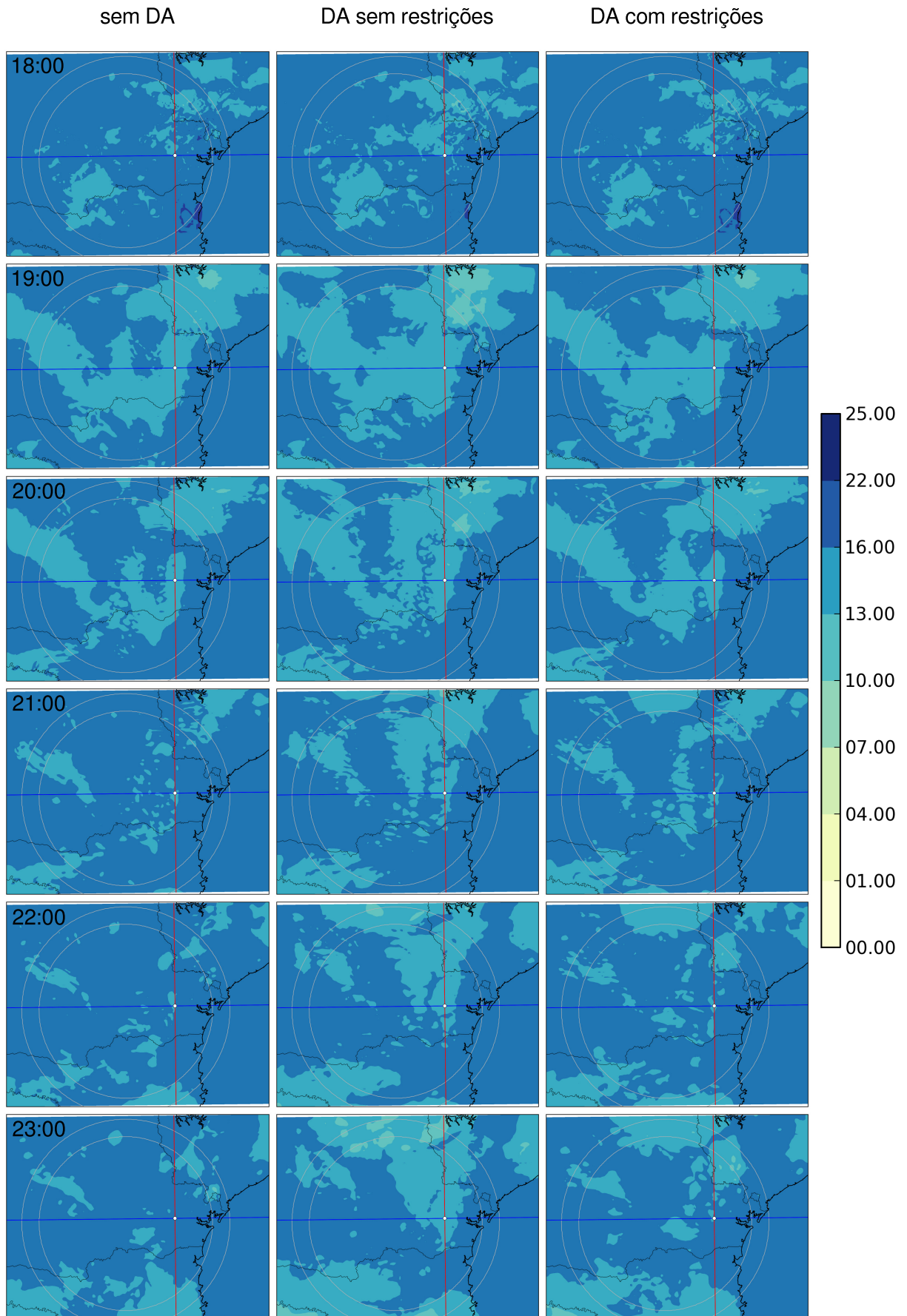


Figura 4.21: Razão de mistura de vapor d'água no nível mais próximo à superfície [Kg/Kg]. Linha vermelha indica a posição do plano meridional e a linha azul o plano zonal. O cruzamento dos planos se dá no ponto: $latitude = -25.41$ e $longitude = -49.25$

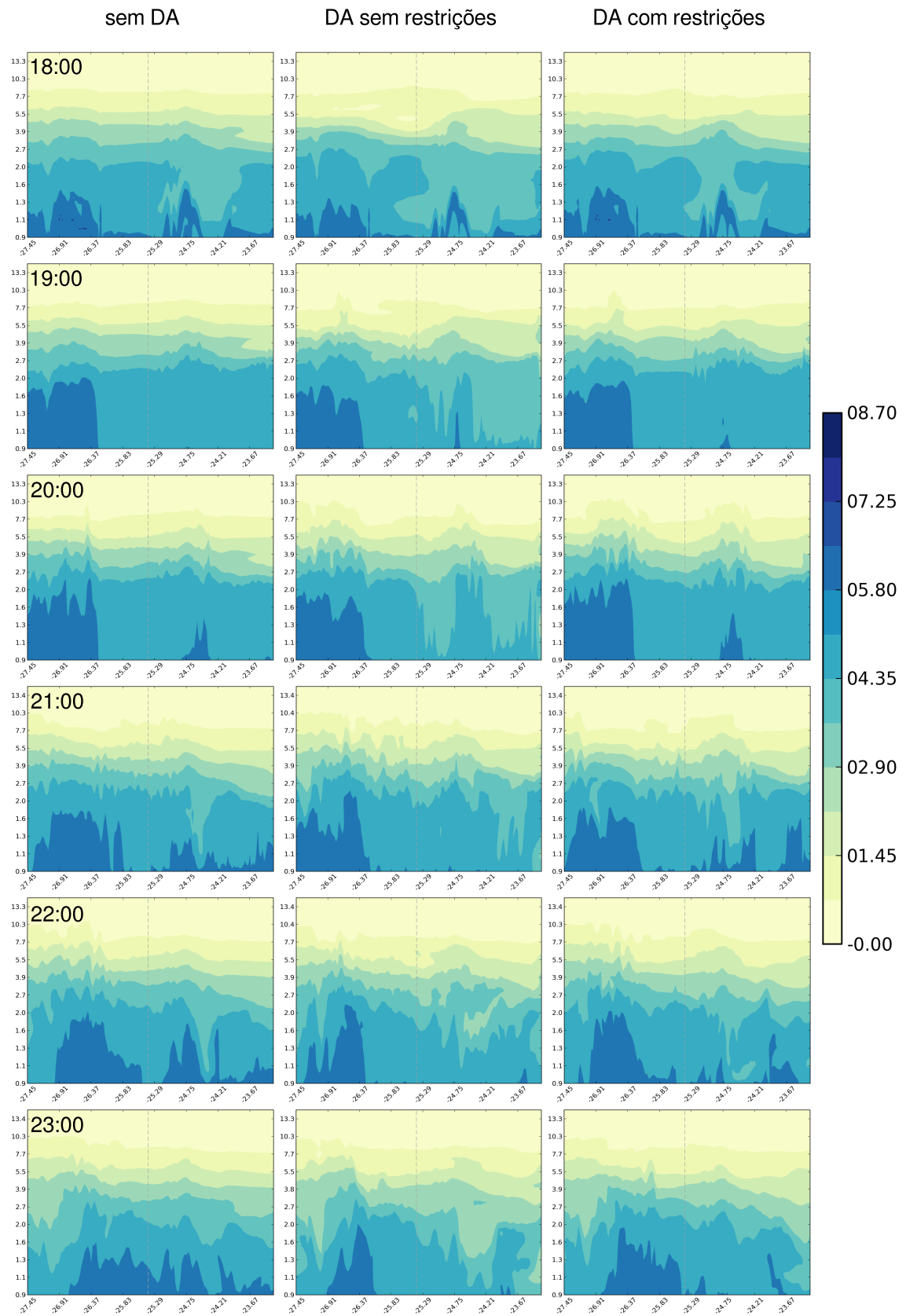


Figura 4.22: Perfil vertical meridional da razão de mistura do vapor d'água [kg/kg] correspondente à linha vermelha da Figura 4.21. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal.

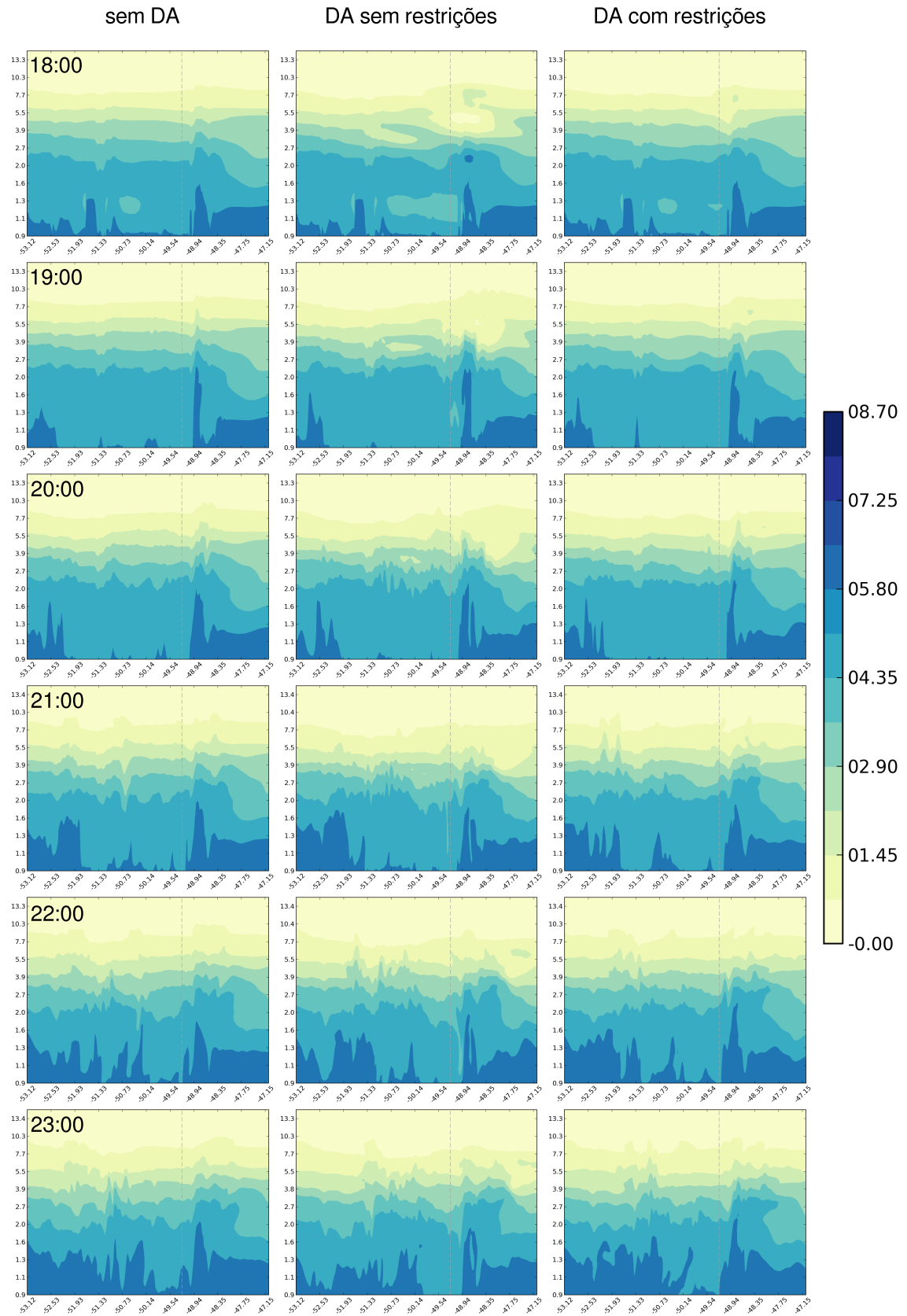


Figura 4.23: Perfil vertical zonal da razão de mistura do vapor d'água [kg/kg] correspondente à linha azul da Figura 4.21. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional.

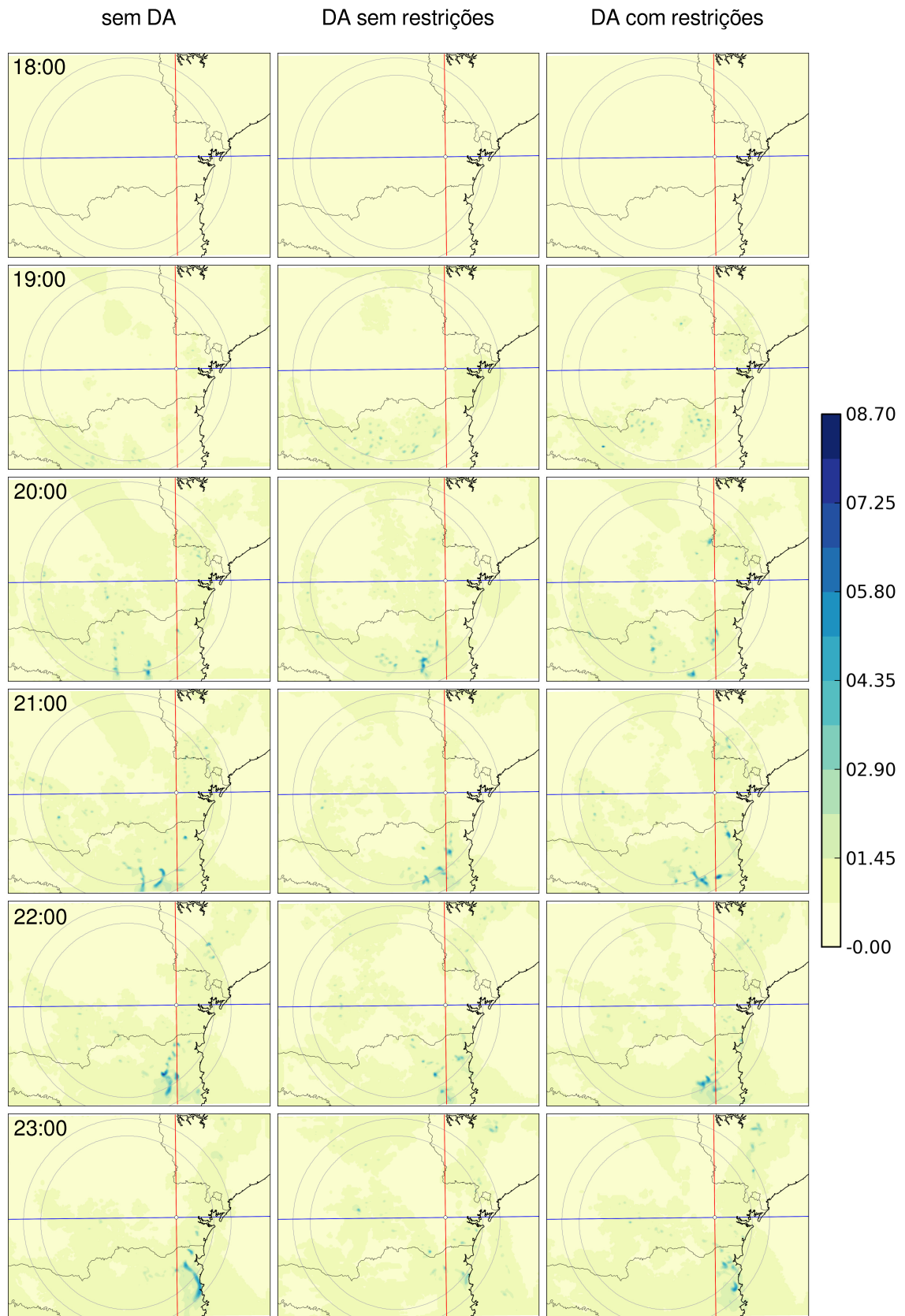


Figura 4.24: Razão de mistura de água de chuva no nível mais próximo à superfície [Kg/Kg]. Linha vermelha indica a posição do plano meridional e a linha azul o plano zonal. O cruzamento dos planos se dá no ponto: $latitude = -25.41$ e $longitude = -49.25$

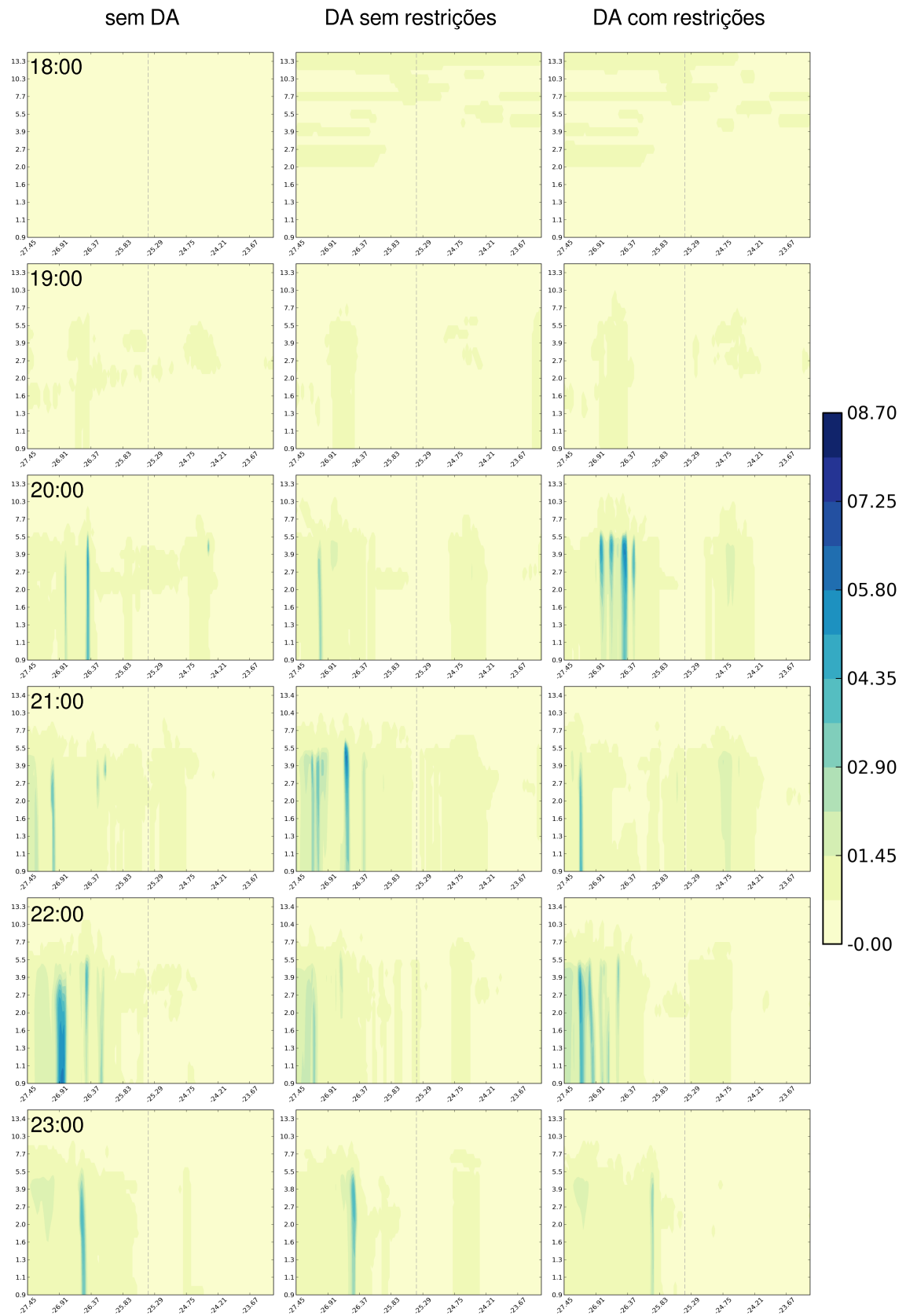


Figura 4.25: Perfil vertical meridional da razão de mistura de água de chuva [kg/kg] correspondente à linha vermelha da Figura 4.24. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal.

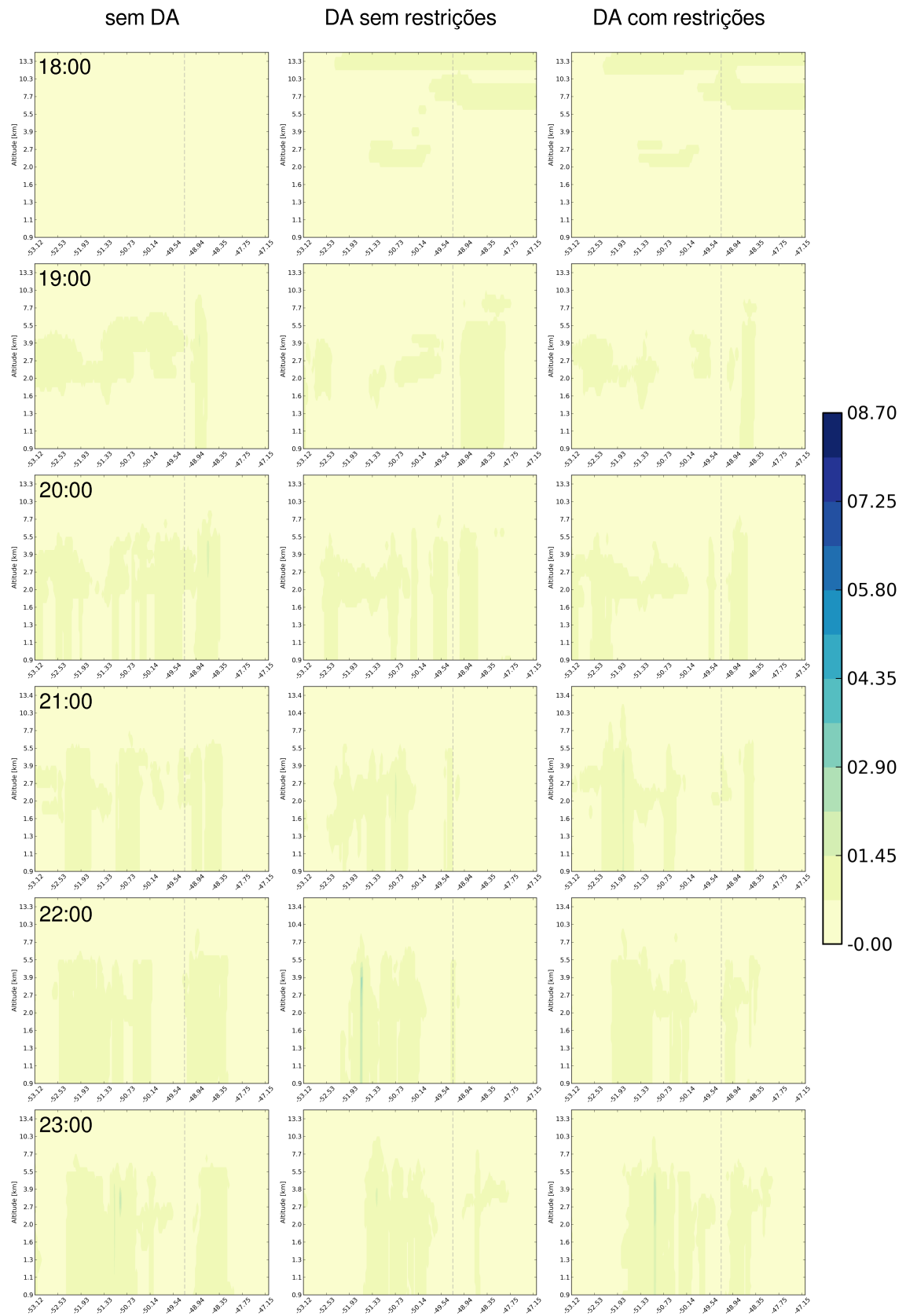


Figura 4.26: Perfil vertical zonal da razão de mistura de água de chuva [kg/kg] correspondente à linha azul da Figura 4.24. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional.

4.3 Caso 20-Junho-2013 12UTC

Nos dados do GFS vemos uma massa de ar frio presente no sul da América do Sul (Figura 4.27). As imagens de satélite mostram a instabilidade gerando por uma frente fria no Atlântico entre Santa Catarina e o Paraná (Figura 4.28).

Essa chuva, por sua persistência, afetou diversos municípios do Paraná. Segundo reportagem, entre os dias 19 e 21 de Junho foram registradas duas mortes, 123 desabrigados e 662 desalojados totalizando 32.263 pessoas atingidas (SENKOVSKI, 2013). A máxima medida de refletividade foi observada às 12h30 do dia 20 em Teixeira Soares/PR.

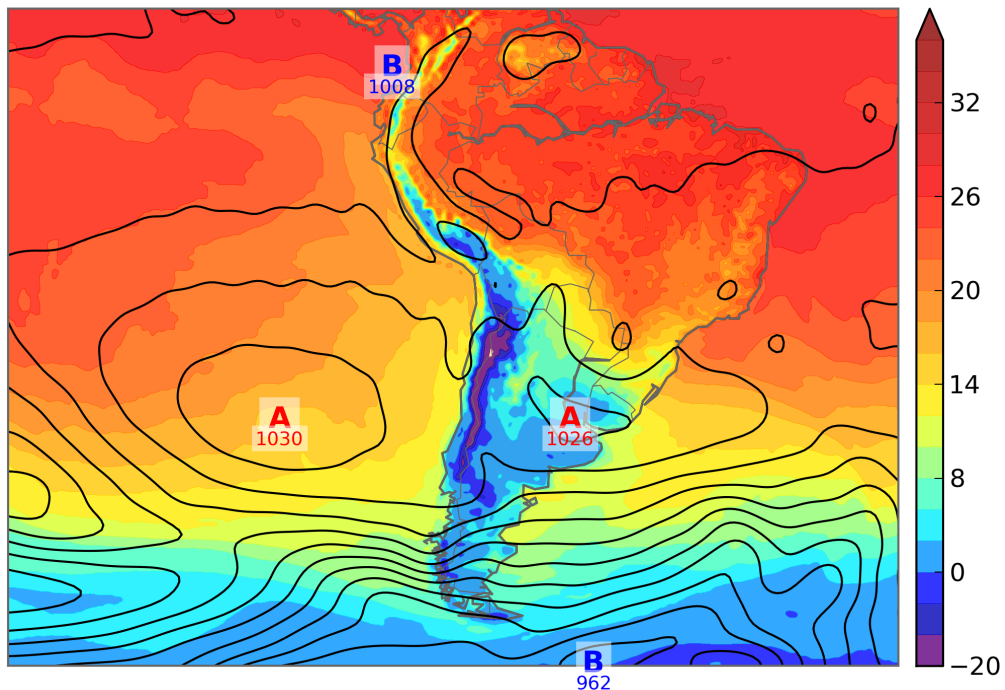


Figura 4.27: Pressão ao Nível Médio do Mar [hPa] e Temperatura a 2m [$^{\circ}\text{C}$] para o dia 20-Jun-2013 às 12h00UTC. Campo extraído do modelo GFS.

Para a análise haviam 47 estações meteorológicas e 493830 medidas do radar disponíveis, na tabela 4.3 é possível ver a quantidade de dados assimilados por variável.

As previsões de refletividade máxima foram superestimadas em toda a área (Figura 4.29). A inserção dos dados observados propiciou uma melhor descrição do núcleo próximo ao centro do Radar às 12h30UTC no esquema mais restrito de assimilação.

O RMSE indica as diferenças na amplitude observadas, já o FSS mostra um acerto um pouco mais elevado que os casos não stratiformes. Novamente o impacto positivo da assimilação aconteceu nas primeiras horas da modelagem.

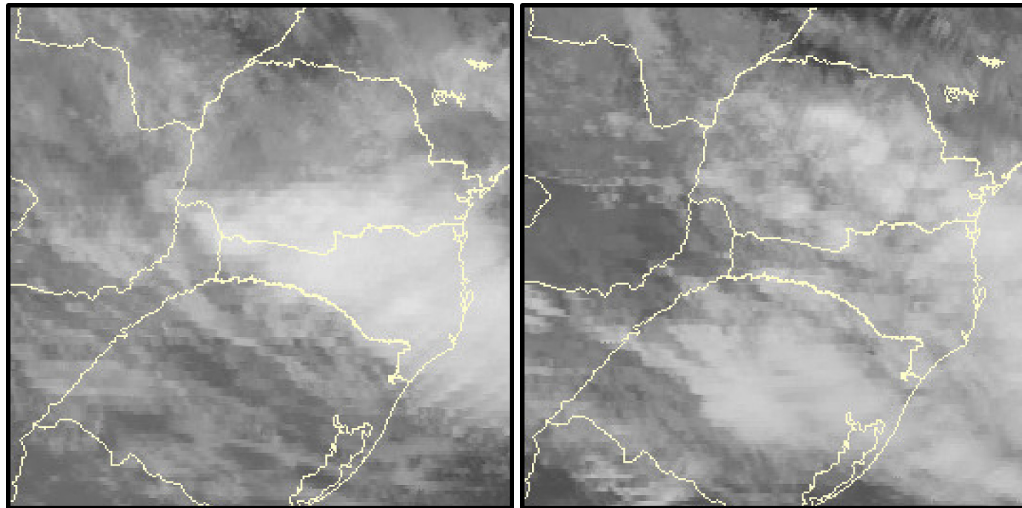


Figura 4.28: Canal 4 do infravermelho pelo satélite GOES-12 para as 12h00UTC (esquerda) e 18h00UTC (direita) do dia 20-Jun-2013. Fonte: CPTEC/INPE

Tabela 4.3: Dados assimilados por variável para o dia 20-Jun-2013

Variável	Qtd Dados Assimilados
Veno zonal	32
Vento meridional	33
Temperatura	37
Razão de mistura de vapor	18
Pressão	36
Refletividade	423075
Velocidade Radial	224858

Comparativamente ao TITAN, o segundo esquema de assimilação deslocou a refletividade para uma região mais próxima da observada para o horário das 12h30UTC, mas superestimou a área com refletividade acima de 35dBz.

Segundo apontado por Oliveira (2014) uma correção da banda brilhante do radar se faz necessária, o que não era conhecido durante o processo de assimilação e que pode ter impactado negativamente neste caso, gerando as superestimativas.

A assimilação modificou a razão de mistura de água de chuva, aumentando nas primeiras horas de previsão (Figuras 4.32 a 4.34). O centro de máxima refletividade às 12h30UTC (Figura 4.29), localizado nas coordenadas $latitude = -25.33$ e $longitude = -50.36$, se traduz no máximo de água de chuva no segundo esquema de assimilação.

Ressalta-se também a diferença na direção da precipitação entre o primeiro e o segundo esquema de assimilação às 17h30. Enquanto o primeiro possui uma distribuição leste-nordeste, o segundo é noroeste, condizendo melhor com o observado.

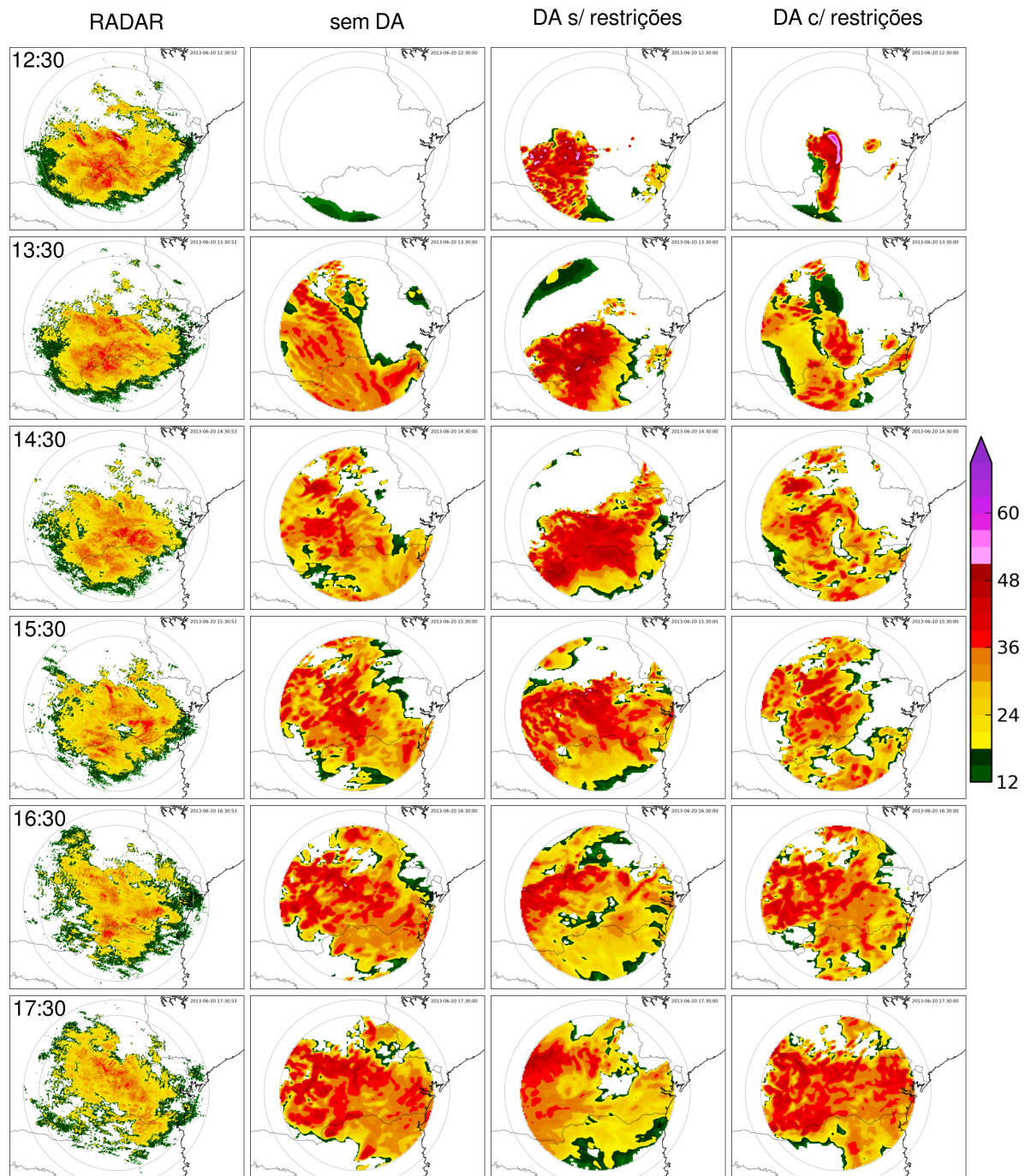


Figura 4.29: Comparação entre máxima refletividade do radar com a previsão nos diferentes esquemas de assimilação entre as 12h30UTC e 17h30UTC do dia 20/06/2013. Primeira coluna: dados observados pelo Radar de Teixeira Soares. Segunda coluna: previsão de controle sem assimilação de dados. Terceira coluna: previsão com o primeiro esquema de assimilação sem restrições nos dados. Quarta coluna: previsão com assimilação, mais restrito aos erros e com raio de influência menor.

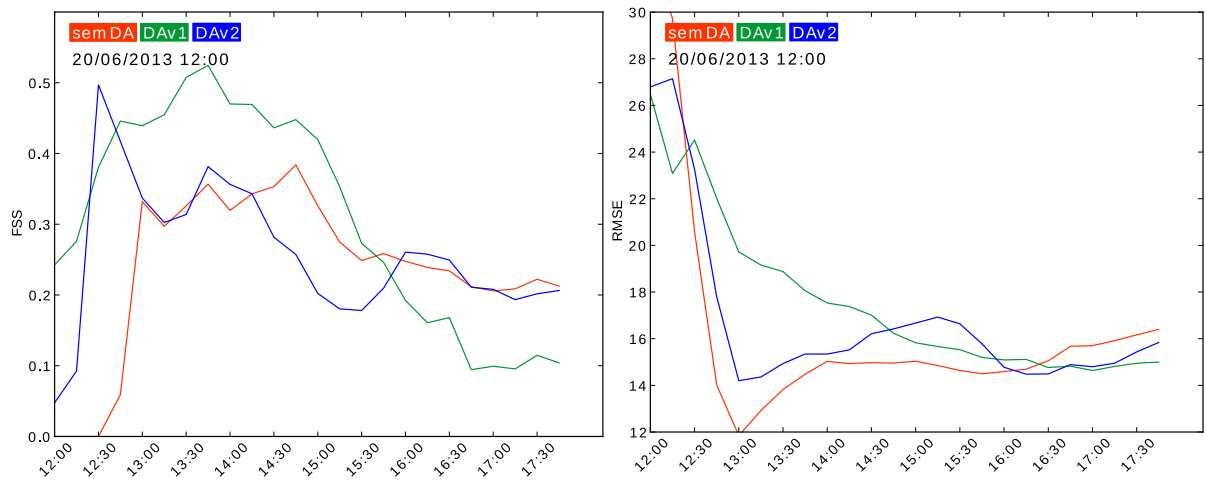


Figura 4.30: Índice FSS (esquerda) e RMSE (direita), calculados para 6h de previsão do dia 20-Jun-2013. Curva vermelha sem assimilação de dados, verde representa primeiro esquema de assimilação e azul o segundo esquema de assimilação.

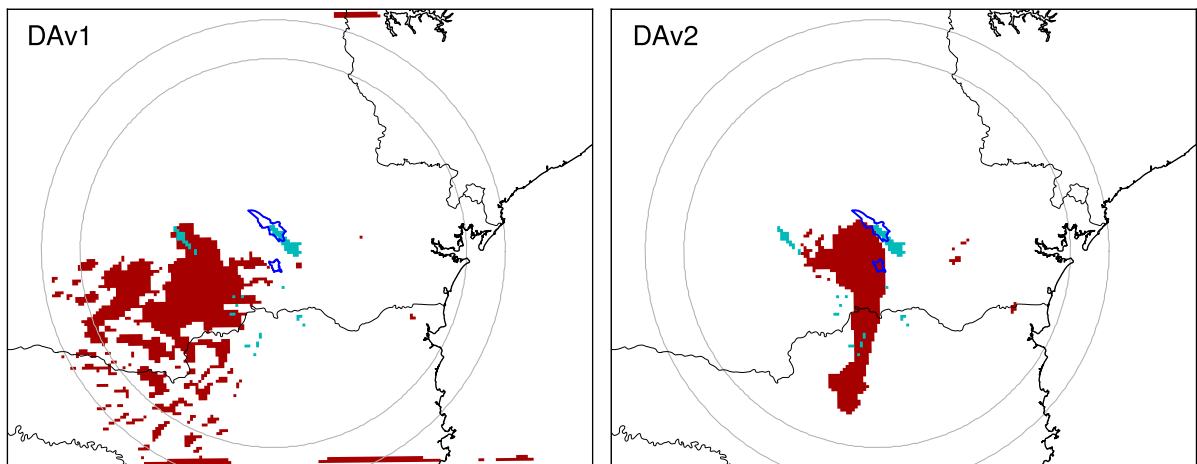


Figura 4.31: Comparação entre o FSS e o TITAN para o dia 20-Jun-2013 às 12:30UTC. Em verde os núcleos medidos pelo Radar, em azul o nowcasting feito com o TITAN, em vermelho o previsto pelo modelo. Na esquerda o primeiro esquema de assimilação e na direita o segundo esquema.

As diferenças nas áreas onde ocorreram precipitação se devem às mudanças da velocidade vertical nos diversos esquemas (Figura 4.35 a 4.36). Percebe-se que o primeiro esquema de assimilação gerou perturbações em W de forma mais distribuída do que no segundo esquema.

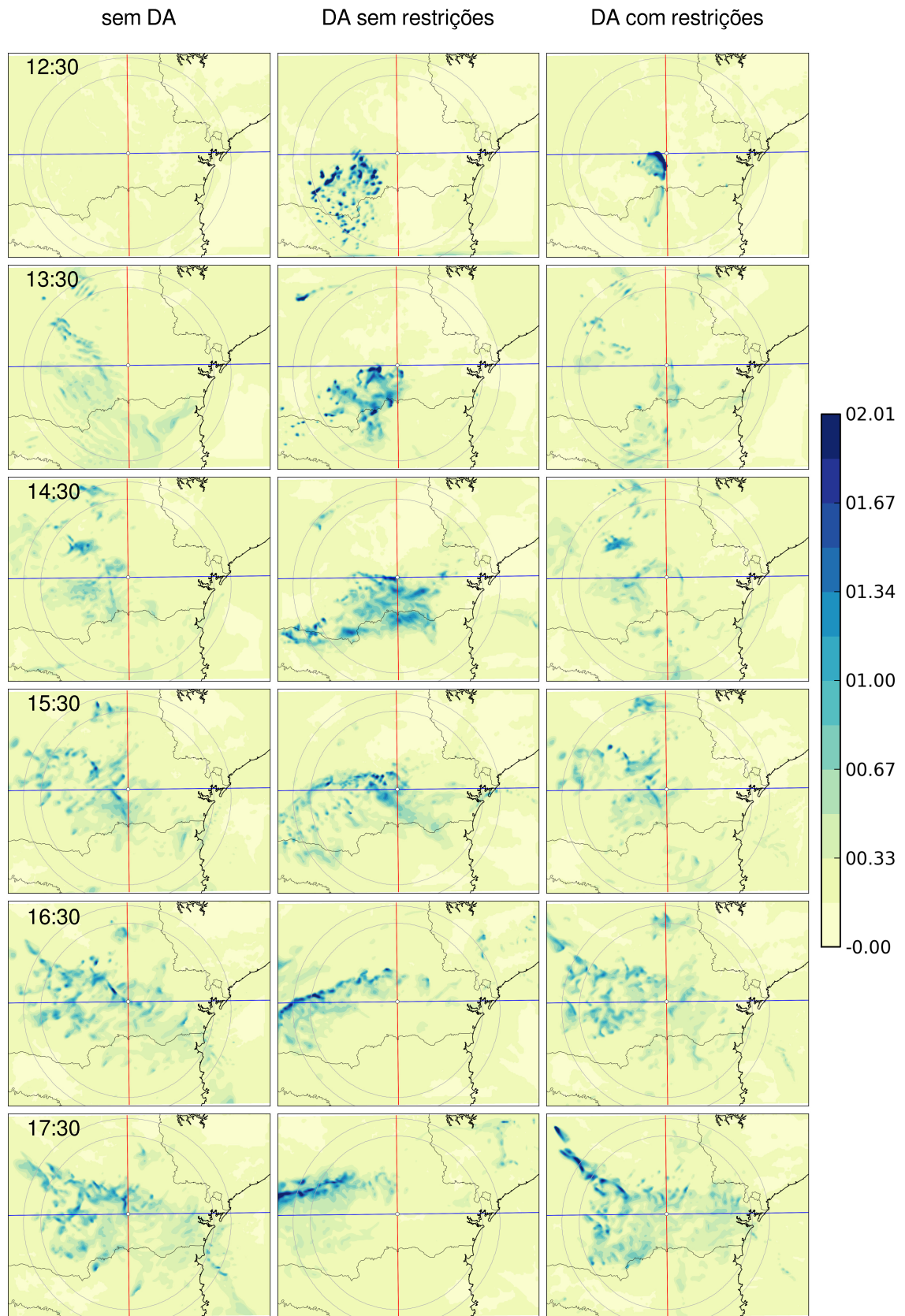


Figura 4.32: Razão de mistura de água de chuva no nível mais próximo à superfície [Kg/Kg]. Linha vermelha indica a posição do plano meridional e a linha azul o plano zonal. O cruzamento dos planos se dá no ponto: $latitude = -25.33$ e $longitude = -50.36$

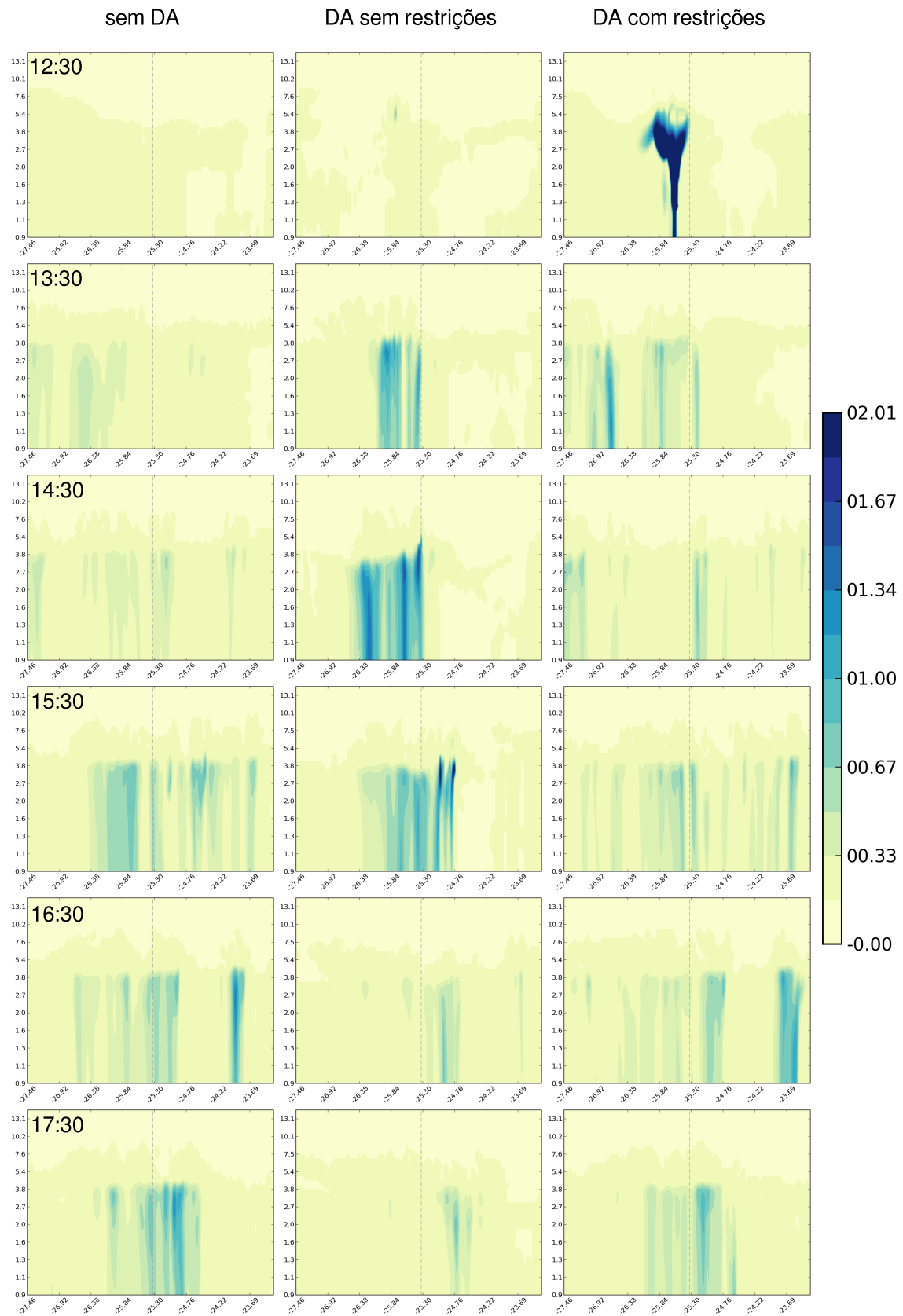


Figura 4.33: Perfil vertical meridional da razão de mistura de água de chuva [kg/kg] correspondente à linha vermelha da Figura 4.32. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal.

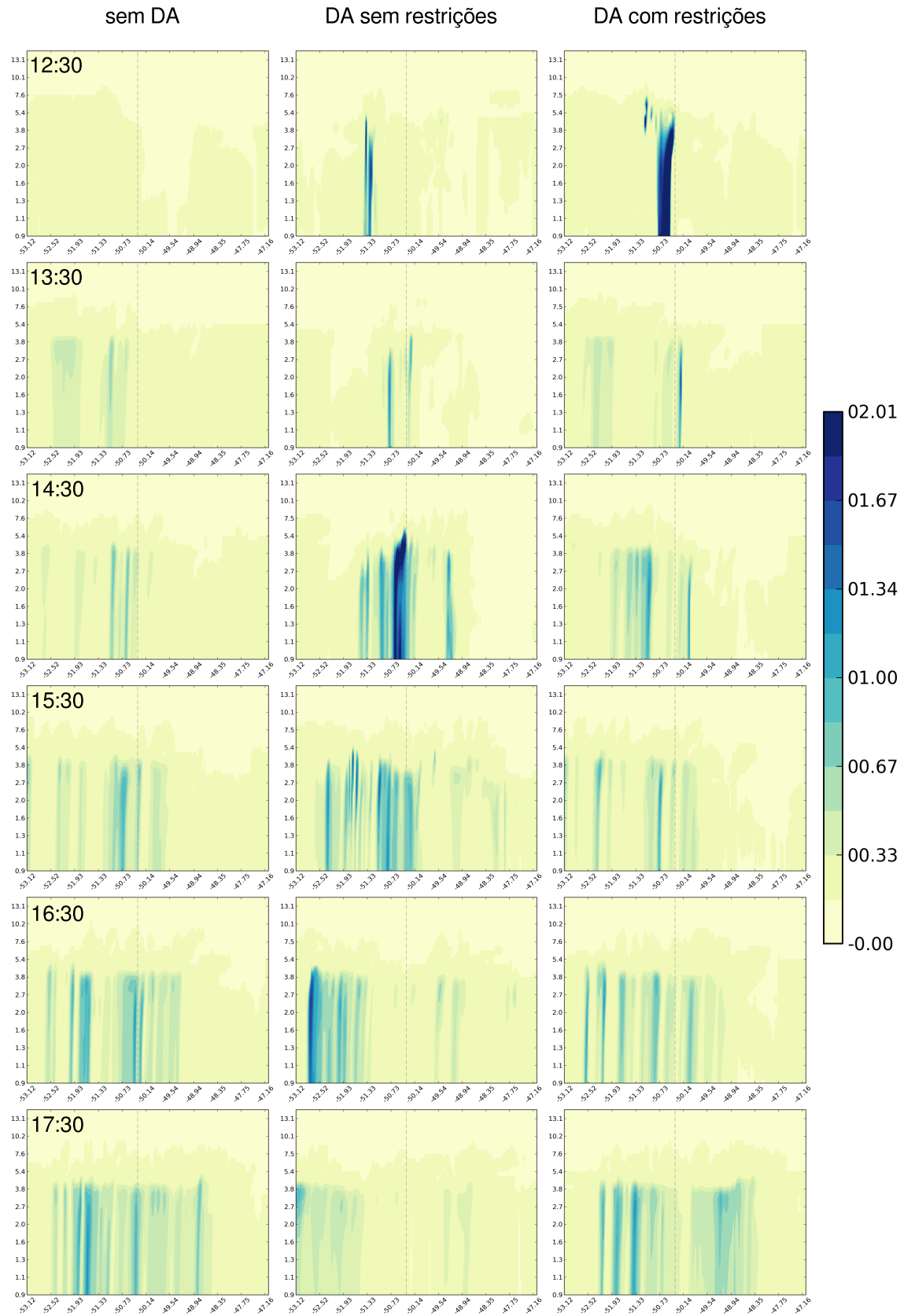


Figura 4.34: Perfil vertical zonal da razão de mistura de água de chuva [kg/kg] correspondente à linha azul da Figura 4.32. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional.

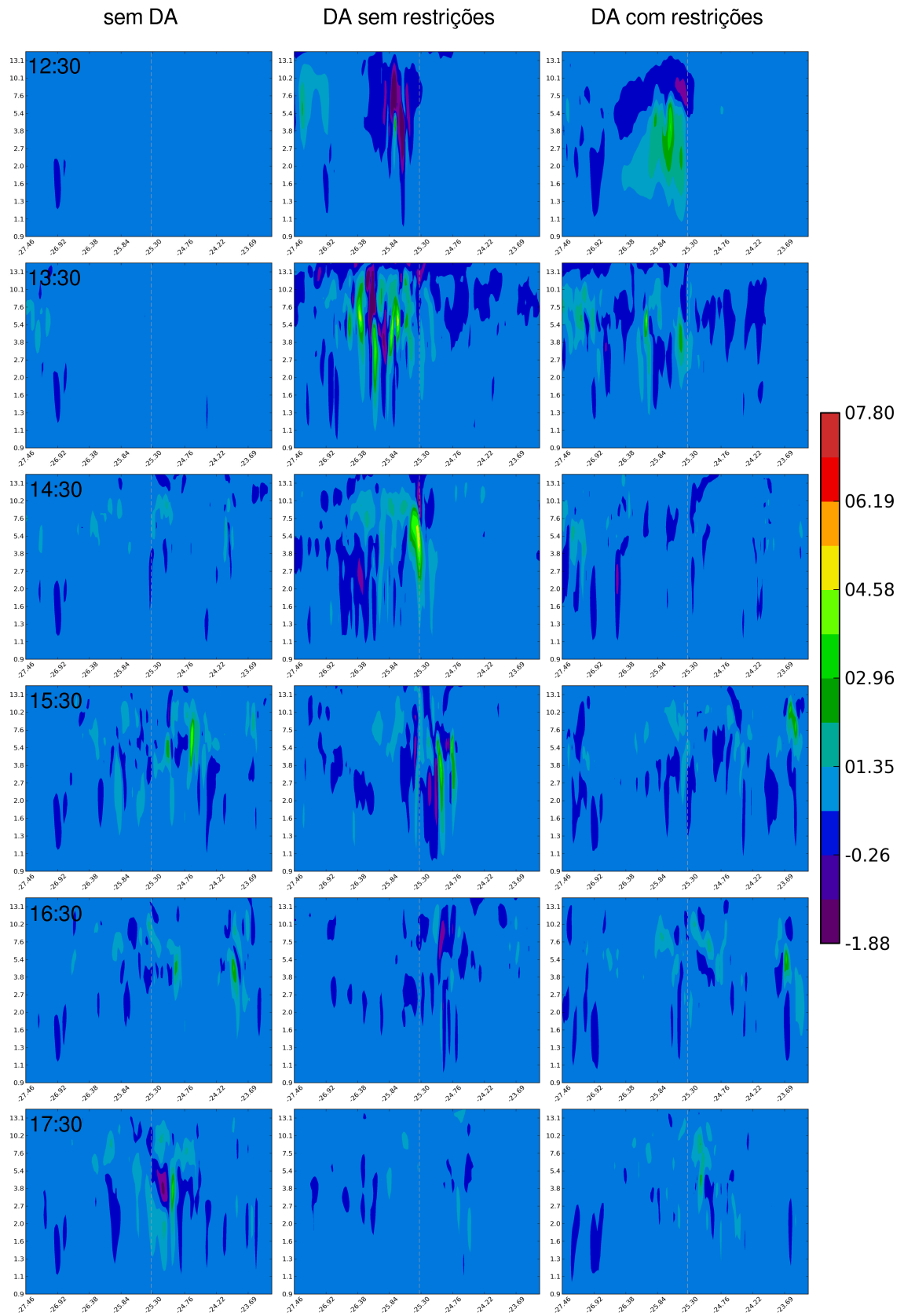


Figura 4.35: Perfil da velocidade vertical [m/s] correspondente à linha vermelha da Figura 4.32. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal.

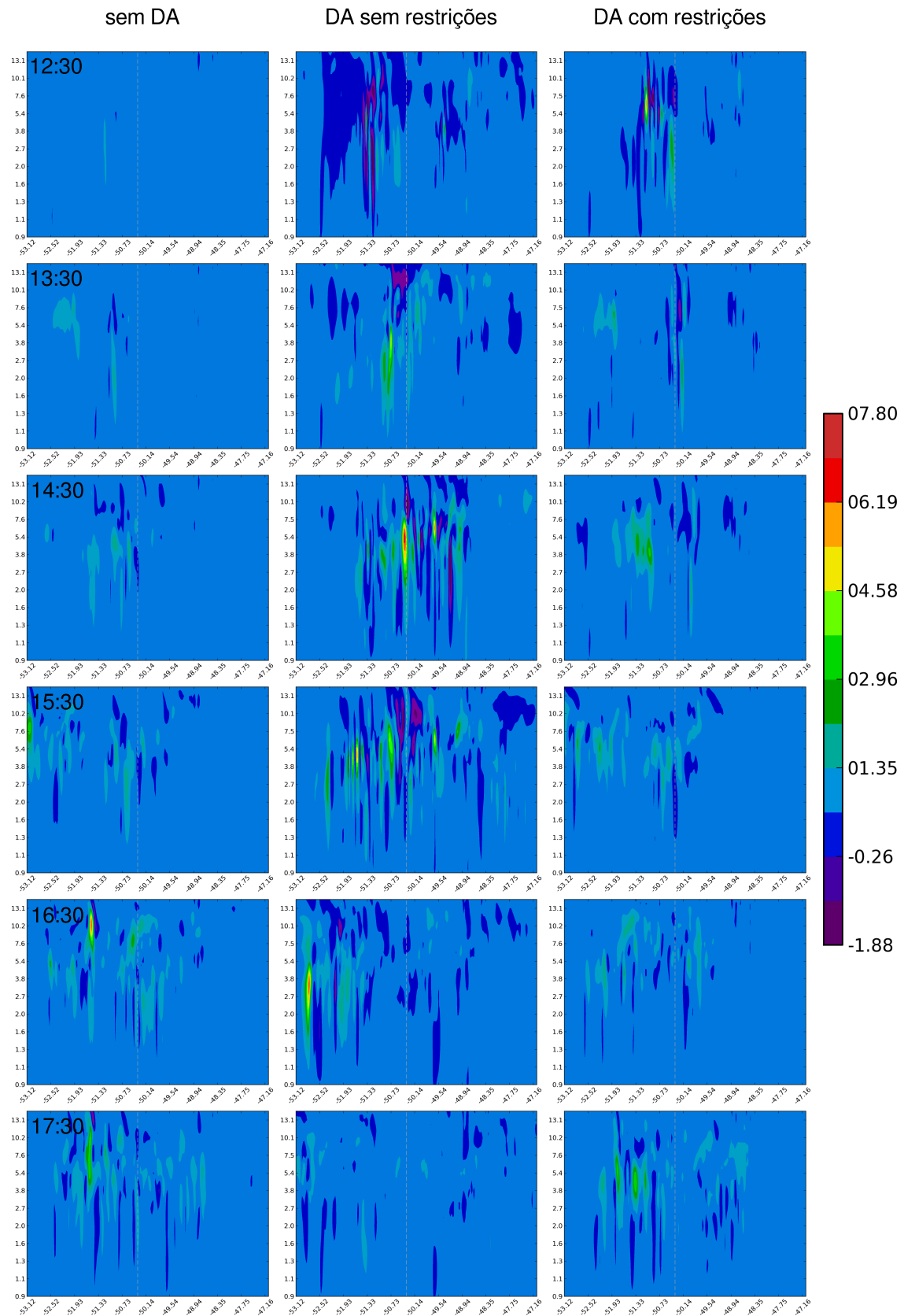


Figura 4.36: Perfil da velocidade vertical [m/s] correspondente à linha azul da Figura 4.32. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional.

4.4 Caso 22-Julho-2013 00UTC

Uma frente fria atuante desde o sul do Mato Grosso e estendendo-se até o Atlântico apresentava características estacionárias entre São Paulo e o Paraná. A instabilidade era favorável a formação de tempestades e a propagação se dava para leste. Nesse dia houve relatos orais de um possível tornado no município de Tibagi/PR às 03h30UTC.

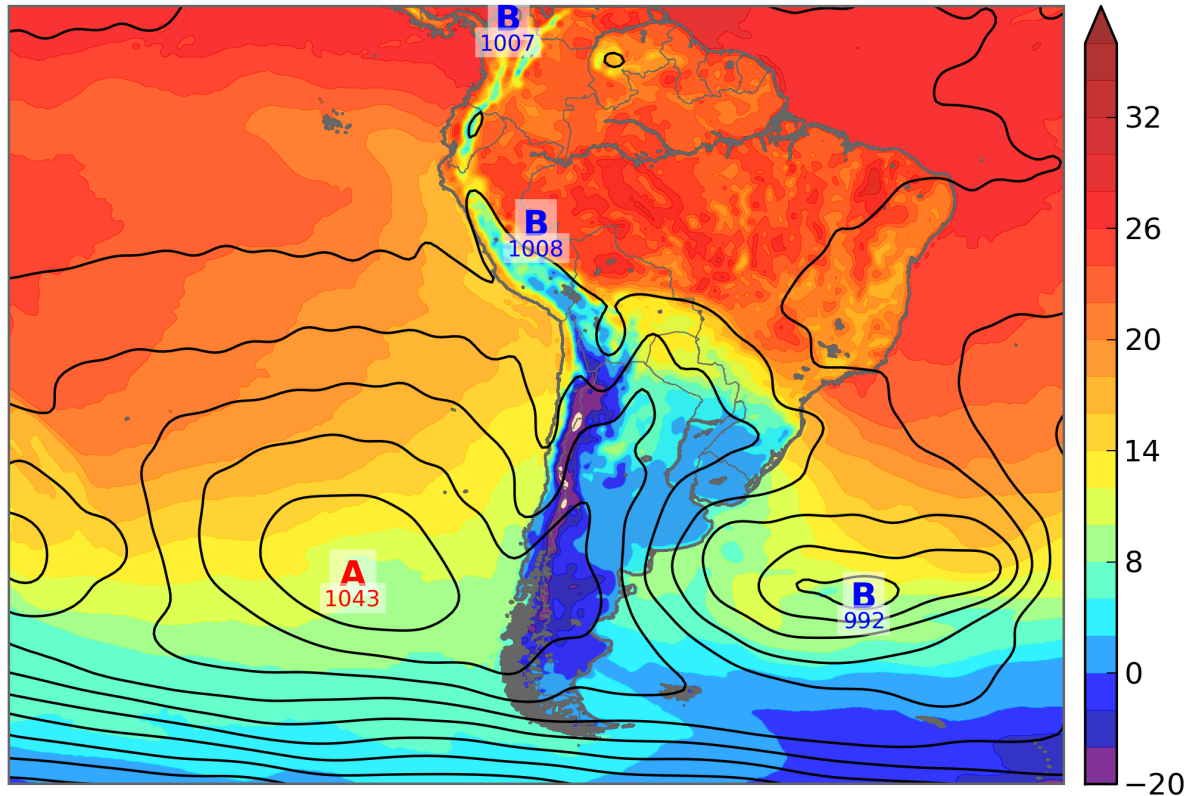


Figura 4.37: Pressão ao Nível Médio do Mar [hPa] e Temperatura a 2m [$^{\circ}\text{C}$] para o dia 22-Jul-2013 às 12h00UTC. Campo extraído do modelo GFS.

Para a análise haviam 43 estações meteorológicas e 24050 medidas do radar disponíveis, na tabela 4.4 é possível ver a quantidade de dados assimilados por variável.

É possível observar nas imagens de satélite (figuras 4.38) que no horário da análise, às 00UTC, haviam alguns núcleos esparsos enquanto que 03h30 depois muitas nuvens se formaram sobre norte e centro do estado. Os núcleos se propagavam para leste, acompanhando o fluxo na escala sinótica.

Como nos outros casos, de modo geral, o modelo superestimou as máximas refletividades. O núcleo de interesse sobre Tibagi não foi previsto por nenhum dos esquemas, evidenciando a dificuldade em prognosticar convecções de curta escala espaço-temporal.

Tabela 4.4: Dados assimilados por variável para o dia 22-Jul-2013

Variável	Qtd Dados Assimilados
Veno zonal	31
Vento meridional	31
Temperatura	33
Razão de mistura de vapor	15
Pressão	31
Refletividade	18832
Velocidade Radial	16201

Essa dificuldade possui relação com a falta de informações para serem assimiladas na análise e à pequena área de abrangência do Radar, que não foi capaz de dar mais informações sobre o fenômeno.

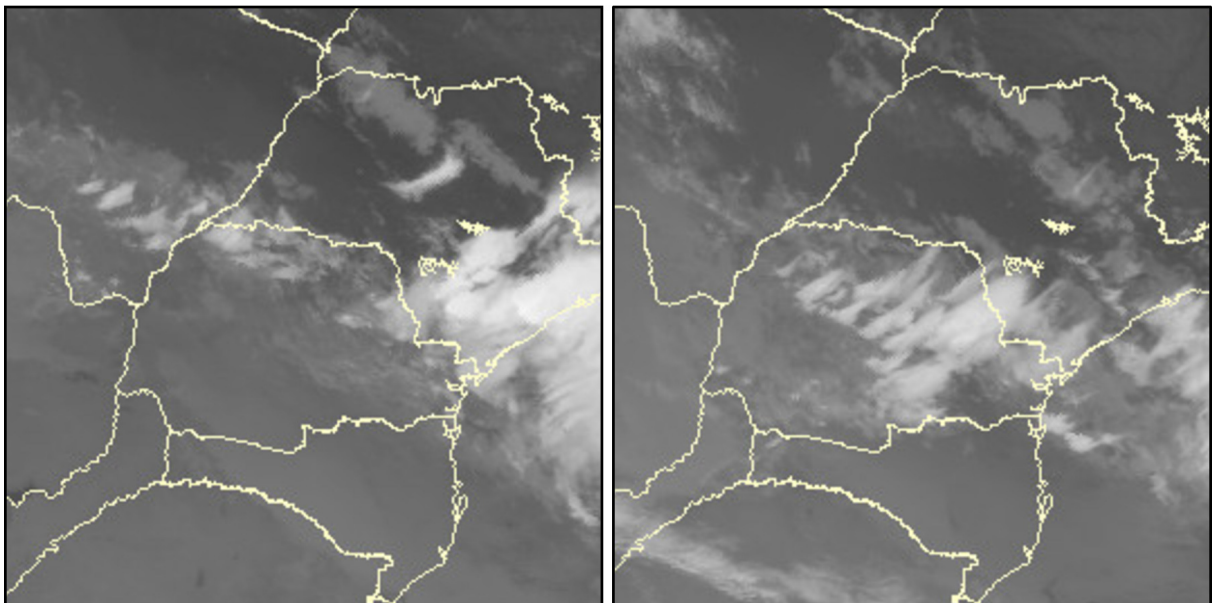


Figura 4.38: Canal 4 do infravermelho pelo satélite GOES-13 para as 00h00UTC (esquerda) e 03h30UTC (direita) do dia 20-Jun-2013. Fonte: CPTEC/INPE

O índice FSS e o RMSE (figura 4.39) indicam que nenhuma das previsões foi capaz de reproduzir bem as convecções. Parte se deve ao fato da pequena extensão espacial e à rápida propagação dos núcleos.

Nas comparações das refletividades observadas com relação às previstas observa-se que a máxima refletividade prevista sem assimilação foi maior do que nos esquemas assimilados principalmente nas três primeiras horas. Observa-se também que os núcleos presentes na previsão estavam adiantadas (mais à leste) do que os núcleos observados.

Nas quantidades de razão de mistura de vapor d'água e água de chuva observa-se

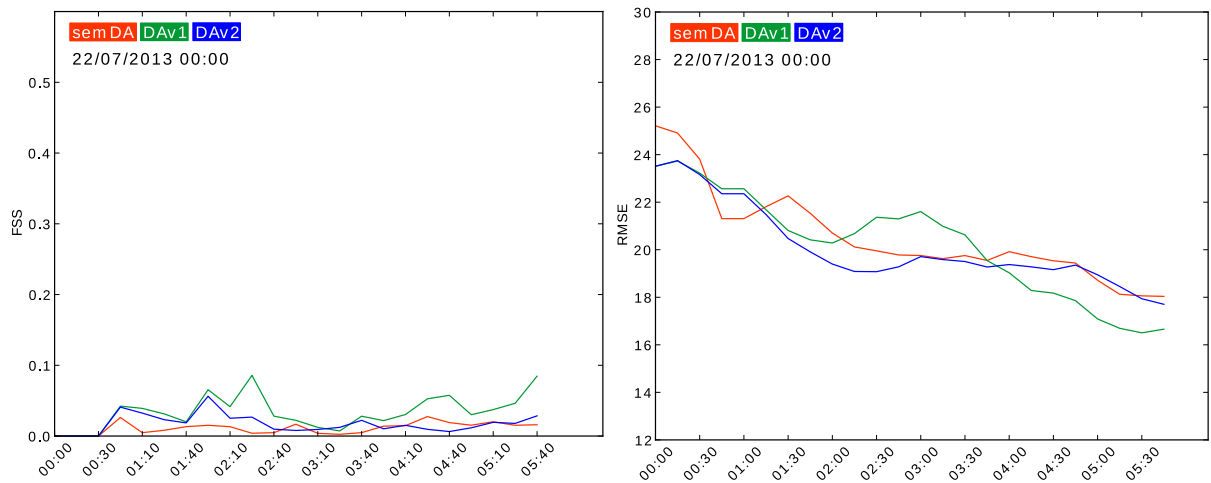


Figura 4.39: Índice FSS (esquerda) e RMSE (direita), calculados para 6h de previsão do dia 22-Jul-2013. Curva vermelha sem assimilação de dados, verde representa primeiro esquema de assimilação e azul o segundo esquema de assimilação.

que as assimilações diminuíram um pouco a quantidade de umidade na parte sudeste do estado (figuras 4.41 e 4.44). Constata-se a diminuição do vapor de água ao norte em superfície e próximo a 2.4km em todo o corte (figura 4.42) próximo à análise. A razão de mistura de água de chuva mostra como a assimilação impactou negativamente nas primeiras horas.

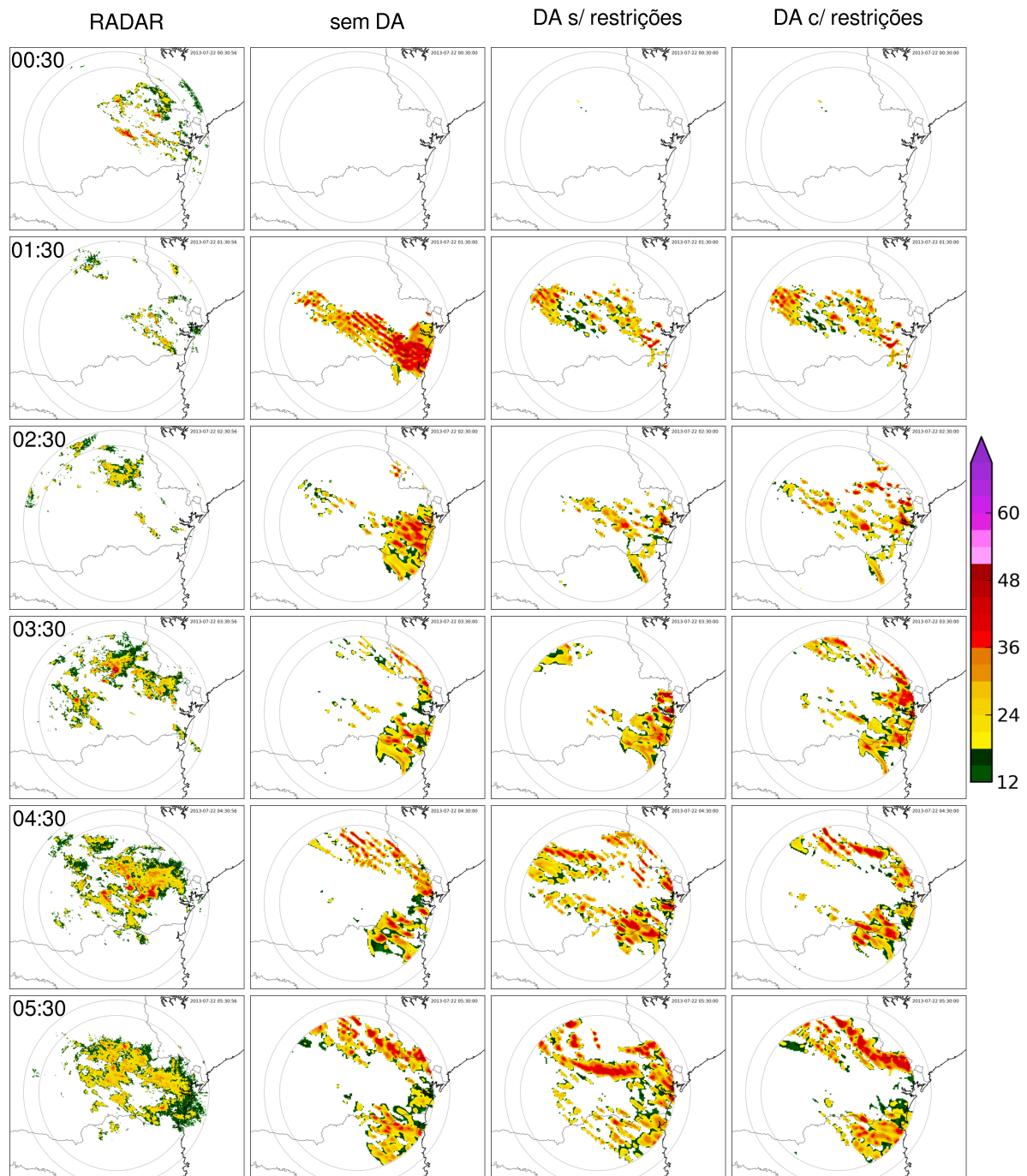


Figura 4.40: Comparação entre máxima refletividade do radar com a previsão nos diferentes esquemas de assimilação entre as 00h30UTC e 05h30UTC do dia 22/07/2013. Primeira coluna: dados observados pelo Radar de Teixeira Soares. Segunda coluna: previsão de controle sem assimilação de dados. Terceira coluna: previsão com o primeiro esquema de assimilação sem restrições nos dados. Quarta coluna: previsão com assimilação, mais restrito aos erros e com raio de influência menor.

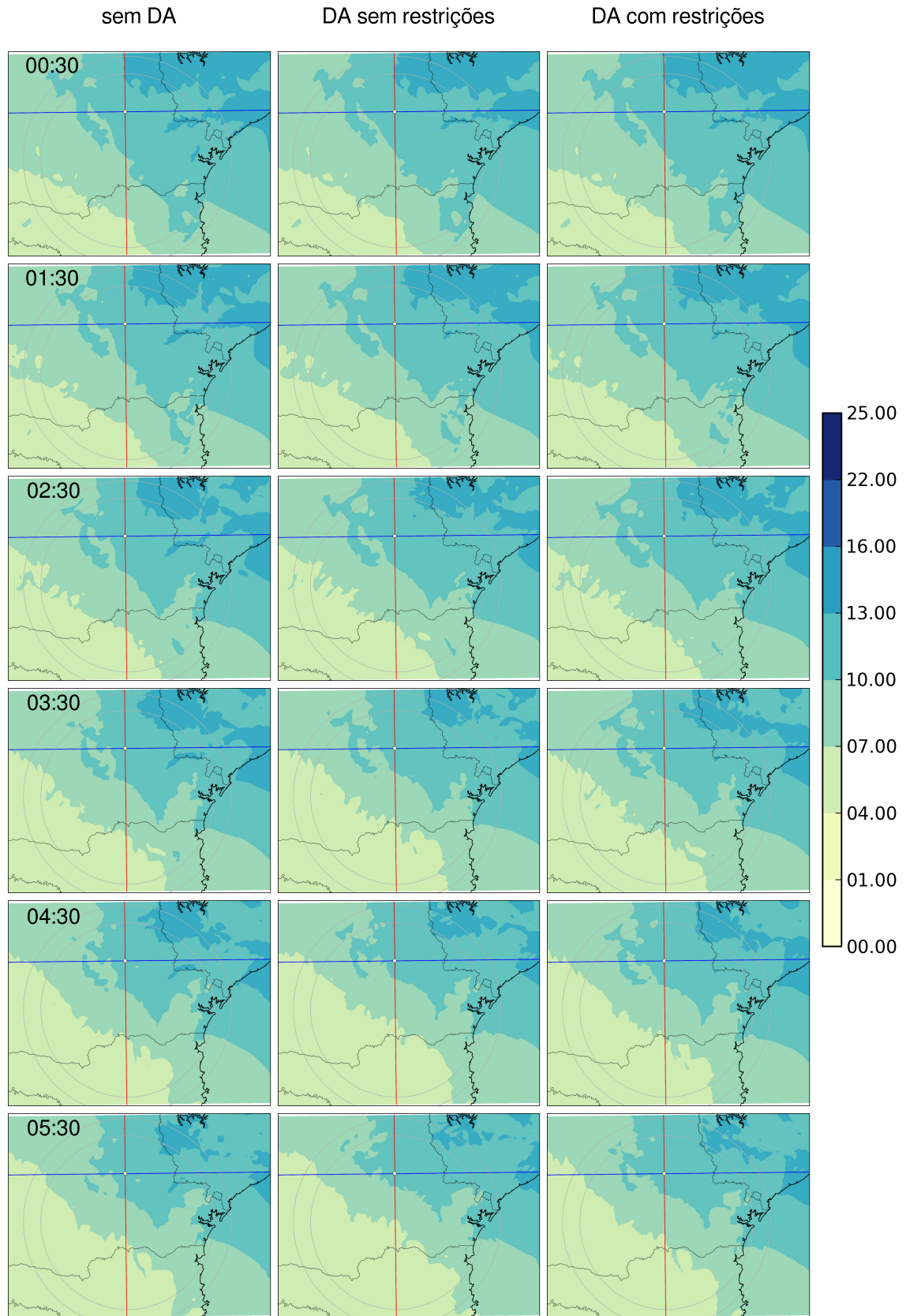


Figura 4.41: Razão de mistura de vapor d'água no nível mais próximo à superfície [kg/kg]. Linha vermelha indica a posição do plano meridional e a linha azul o plano zonal. O cruzamento dos planos se dá no ponto: $latitude = -25.48$ e $longitude = -50.2$

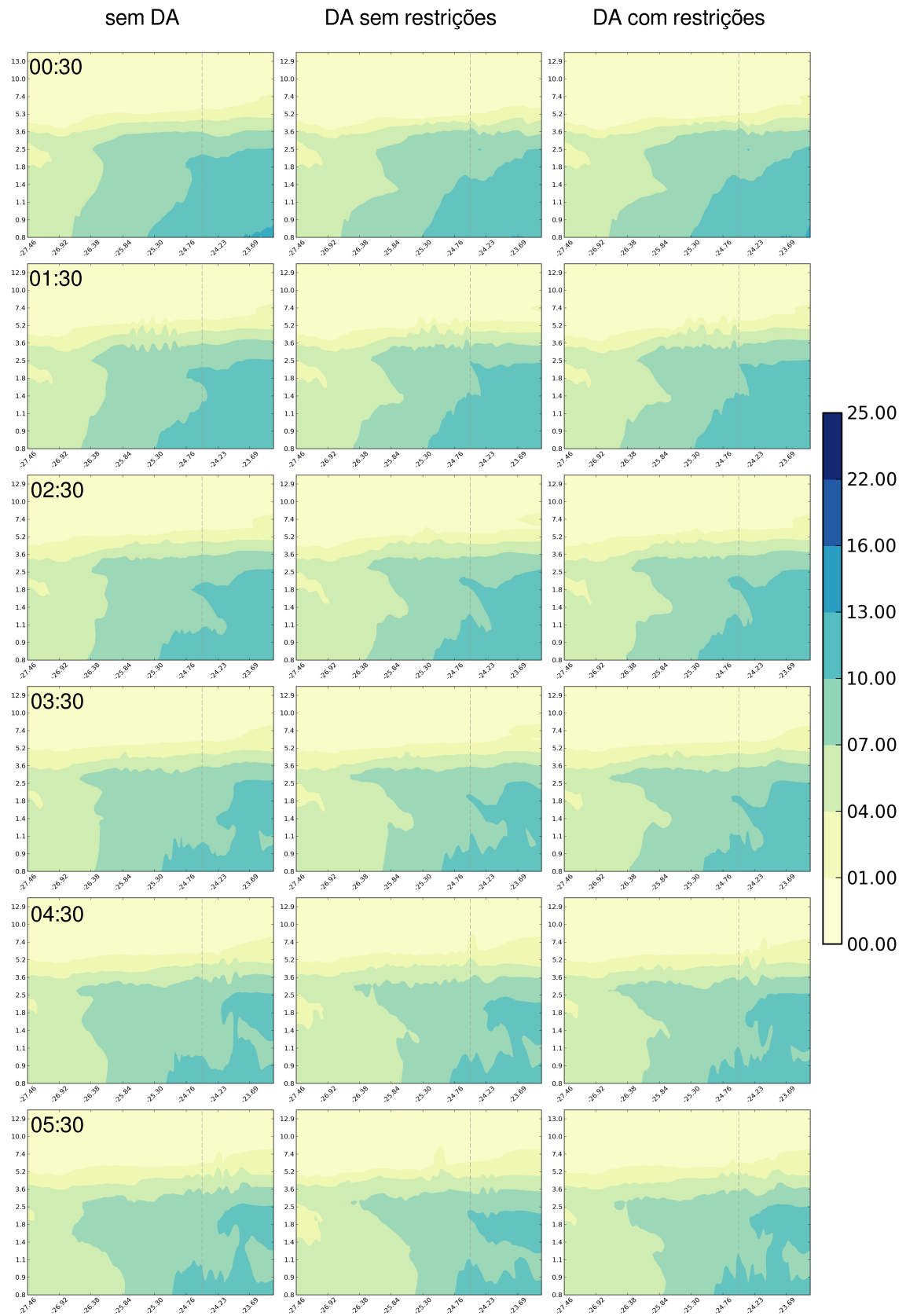


Figura 4.42: Perfil vertical meridional da razão de mistura do vapor d'água [kg/kg] correspondente à linha vermelha da figura 4.41. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal.

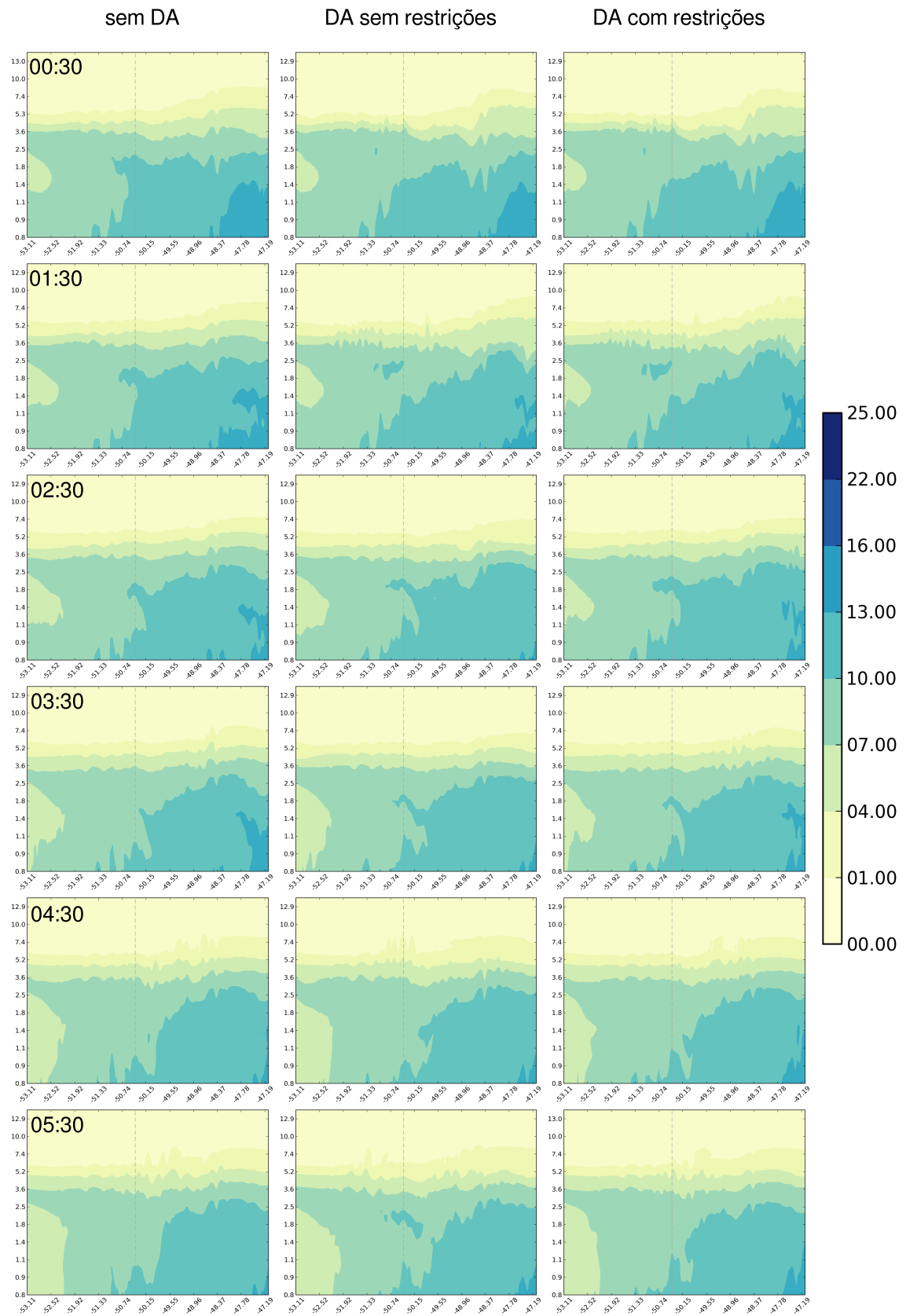


Figura 4.43: Perfil vertical zonal da razão de mistura do vapor d'água [kg/kg] correspondente à linha azul da figura 4.41. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional.

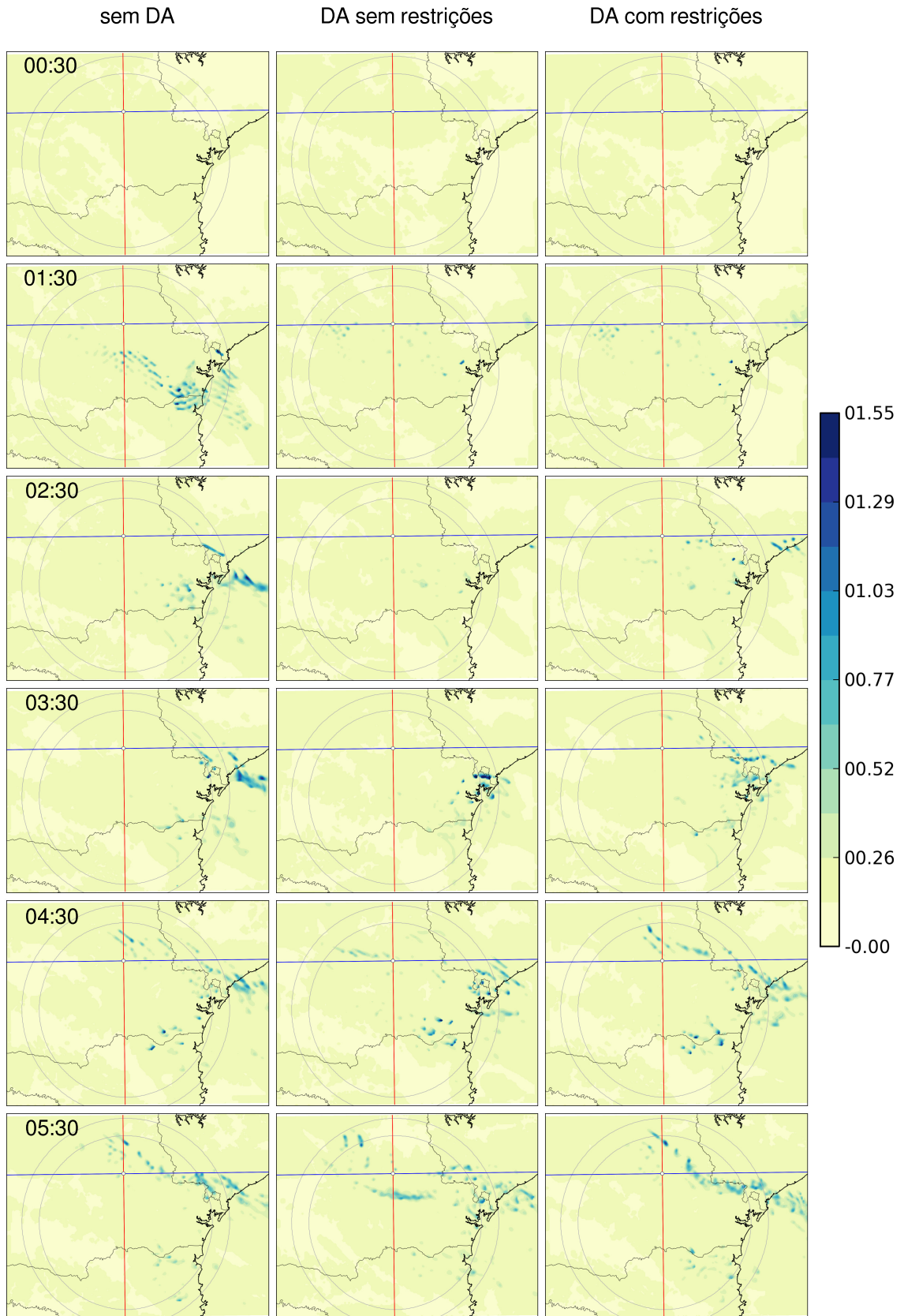


Figura 4.44: Razão de mistura de água de chuva no nível mais próximo à superfície [kg/kg]. Linha vermelha indica a posição do plano meridional e a linha azul o plano zonal. O cruzamento dos planos se dá no ponto: $latitude = -25.48$ e $longitude = -50.2$

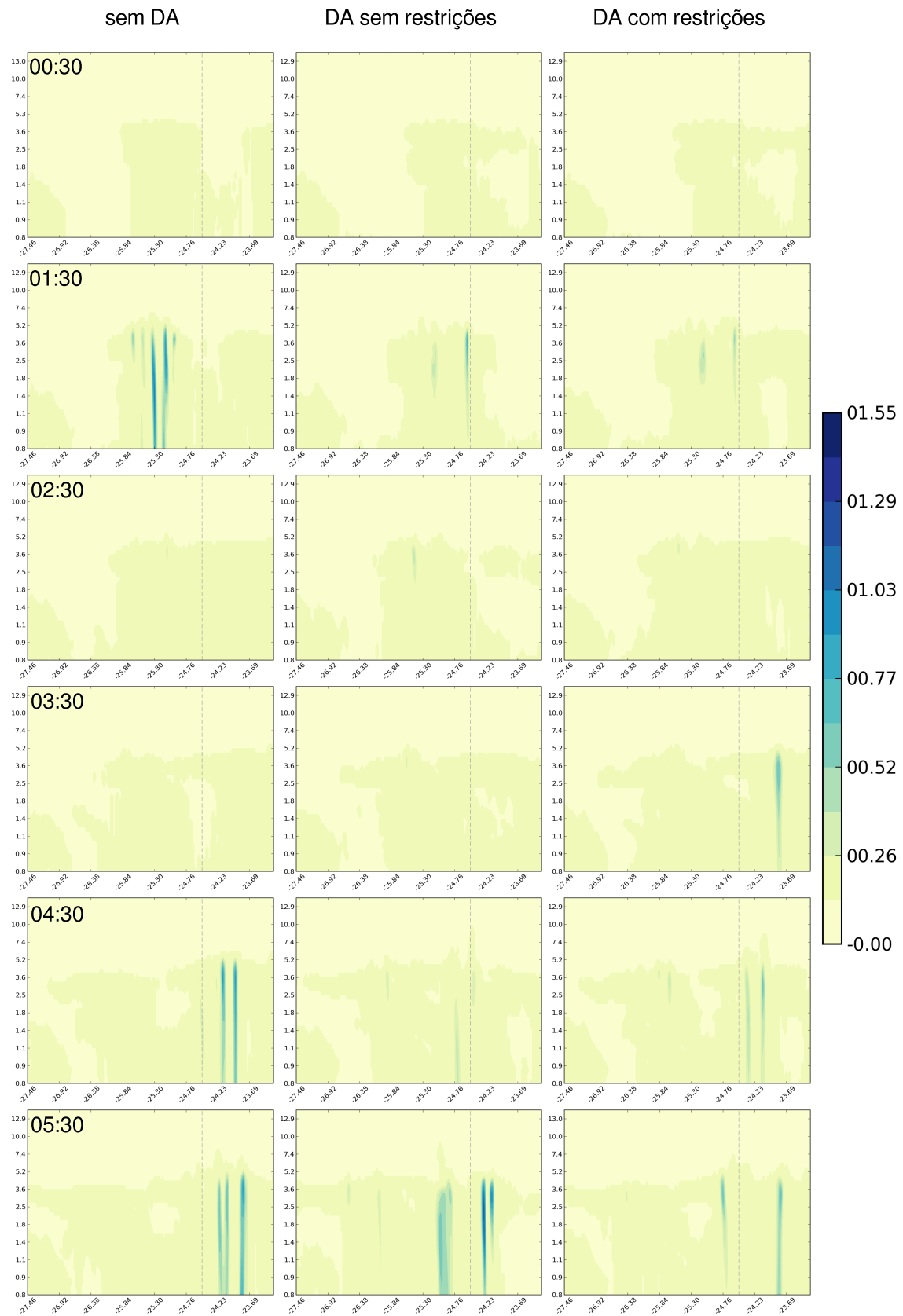


Figura 4.45: Perfil vertical meridional da razão de mistura água de chuva [kg/kg] correspondente à linha vermelha da figura 4.44. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano zonal.

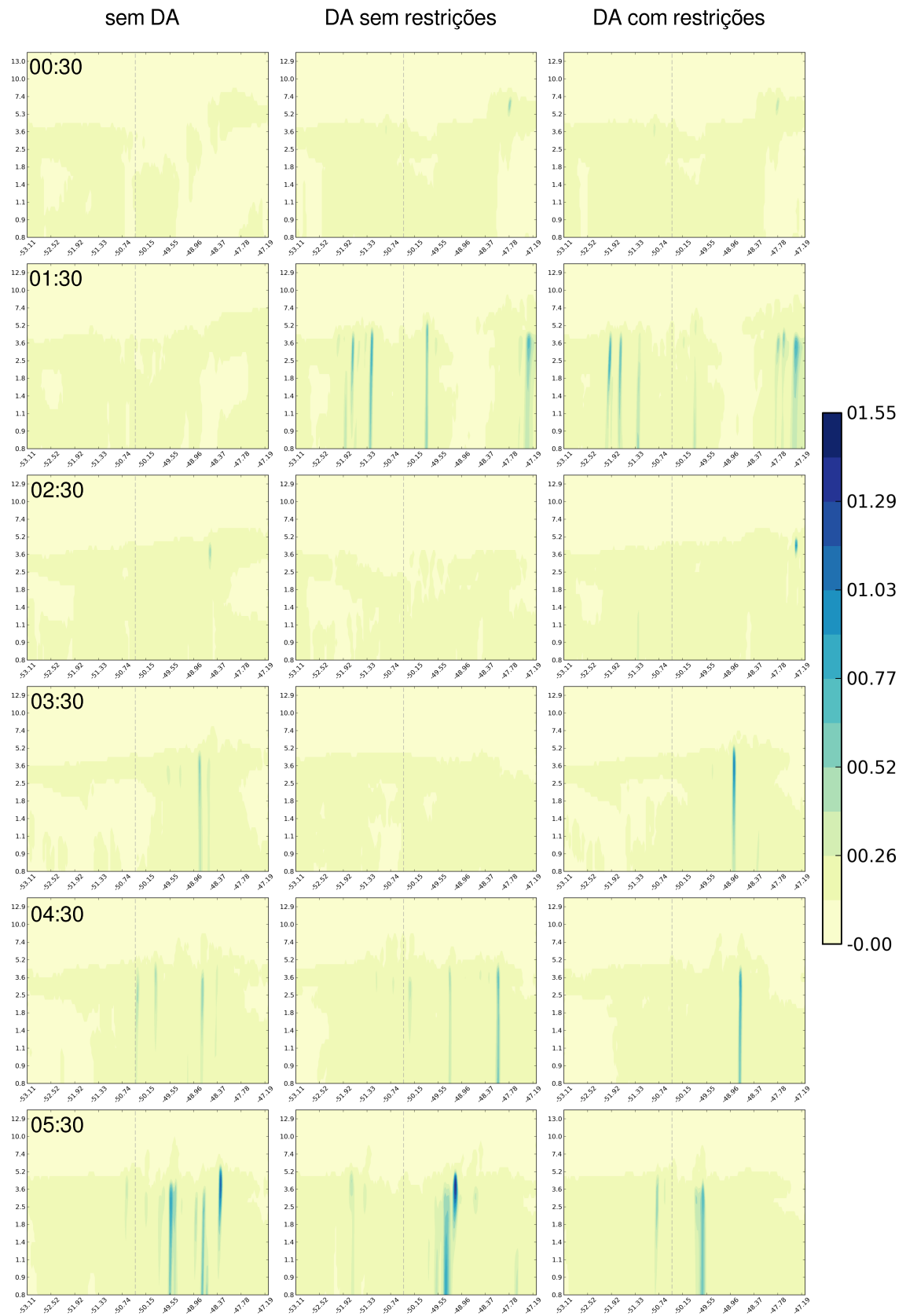


Figura 4.46: Perfil vertical zonal da razão de mistura água de chuva [kg/kg] correspondente à linha azul da figura 4.44. Linha tracejada indica a posição do cruzamento com o plano meridional.

5 Conclusão

Nos casos analisados vemos que a assimilação dos dados de Radar e das estações modificaram a quantidade de umidade no modelo e a solução da convecção e, dentre as variações de assimilação efetuadas, a com opções mais restritivas em relação aos dados teve um maior FSS na previsão dos núcleos de precipitação quando não era muito grande as diferenças entre a análise e o observado. Porém, a modelagem superestimou as refletividades em todos os casos. O impacto da assimilação, quando houve, foi maior durante as primeiras 3h de modelagem.

A assimilação teve um impacto positivo, ou no pior dos casos não modificou o prognóstico. Isso aliado ao baixo custo computacional envolvido nas inicializações frias torna sua implementação viável.

O TITAN representou os núcleos com uma forma mais próxima ao observado, mas não foi capaz de acompanhar a fase do fenômeno. Os esquemas assimilados são uma ferramentas úteis para compor os possíveis cenários de previsão.

Dentro do escopo proposto pelo projeto, que era de dar os primeiros passos na assimilação de dados de Radar e analisar os seus impactos, a assimilação melhorou a simulação de fenômenos convectivos, especialmente quando o desenvolvimento da convecção fora detectado nas imagens de Radar. Ao contrário, quando não houve a identificação de iniciação convectiva nos dados de refletividade, as simulações apresentaram desempenho similar às rodadas sem assimilação.

Como sugestão para trabalhos futuros podemos citar: a implementação das estatísticas dos erros do background multivariada, novas metodologias para o cálculo dos erros de medida do radar, a assimilação de mais de um radar, o uso de ensembles, assimilar com o 4D-Var e implementar correções nos dados observados.

Referências Bibliográficas

- BARKER, D. et al. *A Three-Dimensional Variational (3DVAR) Data Assimilation System For Use With MM5*. [S.l.], 2001.
- BARKER, D. et al. A three-dimensional variational data assimilation system for mm5: Implementation and initial results. *Monthly Weather Review*, v. 132, p. 897–914, 2004.
- BECK, V. C. *Assimilação 3DVAR no WRF e a Previsão do Tempo no Sul do Brasil*. 2013.
- BJERKNES, V. et al. *Dynamic Meteorology and Hydrography: Kinematics, by V. Bjerknes, Th. Hesselberg and O. Devik*. [S.l.]: Carnegie Institution of Washington, 1911. (Carnegie Institution of Washington. Publication no. 88).
- BOUTTIER, F.; COURTIER, P. Data assimilation concepts and methods. In: . [S.l.]: ECMWF, 1999.
- BOUTTIER, F.; RABIER, F. The operational implementation of 4d-var. *ECMWF Newsletter*, n. 78, p. 2–5, 1997.
- CHARNEY, J. G. Dynamical forecasting by numerical process. In: *Compendium of meteorology*. [S.l.]: American Meteorological Society, 1951.
- CHARNEY, J. G.; FJÖRTOFT, R.; NEUMANN, J. V. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, Blackwell Publishing Ltd, v. 2, n. 4, p. 237–254, 1950. ISSN 2153-3490. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.2153-3490.1950.tb00336.x>>.
- COHN, S. E. et al. Assessing the effects of data selection with the dao physical-space statistical analysis system. *Monthly Weather Review*, v. 126, n. 11, p. 2913–2926, 1998.
- COURANT, R.; FRIEDRICHS, K.; LEWY, H. Über die partiellen differenzengleichungen der mathematischen physik. *Mathematische Annalen*, Springer-Verlag, v. 100, n. 1, p. 32–74, 1928. ISSN 0025-5831. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF01448839>>.
- CRESSMAN, G. P. An operational objective analysis system. *Monthly Weather Review*, v. 87, p. 367–374, 1976.
- DALEY, R. *Atmospheric Data Analysis*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1993. (Cambridge Atmospheric and Space Science Series). ISBN 9780521458252.
- DERBER, J.; WU, W.-S. The use of tovs cloud-cleared radiances in the ncep ssi analysis system. *Monthly Weather Review*, v. 126, n. 8, p. 2287–2299, 1998.
- DHUDIA, J. Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 46, n. 20, p. 3077–3107, 1989.

- DIXON, M.; WIENER, G. Titan: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—a radar-based methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 10, p. 785–797, 1993.
- GAO, J. et al. A 3dvar method for doppler radar wind analysis with recursive filter. In: *31st Conf. on Radar Meteorology*. [S.l.]: American Meteorological Society, 2003.
- GILCHRIST, B.; CRESSMAN, G. P. An experiment in objective analysis. *Tellus*, Blackwell Publishing Ltd, v. 6, n. 4, p. 309–318, 1954. ISSN 2153-3490. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.2153-3490.1954.tb01126.x>>.
- GOLDING, B. W. Nimrod: a system for generating automated very short range forecasts. *Meteorological Applications*, v. 5, p. 1–16, 1998.
- GUO, Y.; LI, R. Observation pre-processor for wrfda. In: . [S.l.]: WRFDA Tutorial, 2012.
- HA, J.-H.; LEE, D.-K. Effect of length scale tuning of background error in wrf- 3dvar system on assimilation of high-resolution surface data for heavy rainfall simulation. *Advances in Atmospheric Sciences*, v. 29, n. 6, p. 1142–1158, 2012.
- HOKE, J.; ANTHES, R. The initialization of numerical models by a dynamic relaxation technique. *Monthly Weather Review*, v. 104, p. 1551–1556, 1976.
- HONG, S.-Y.; NOH, Y.; DUDHIA, J. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review*, v. 134, p. 2318–2341, 2006.
- IDE, K. et al. *Unified Notation for Data Assimilation: Operational, Sequential and Variational*. 1997. 181-189 p.
- KAIN, J. S. The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, v. 43, n. 1980, p. 170–181, 2004.
- KALNAY, E. *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003. ISBN 9780521796293.
- KOKITSU, J. M. *Transferência de tecnologias para aplicação direta ao monitoramento e nowcasting usando os radares meteorológicos Doppler do IPMET-UNESP*. São Paulo, set./out. 2005.
- LIU, J.; BRAY, M.; HAN, D. A study on wrf radar data assimilation for hydrological rainfall prediction. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17, n. 8, p. 3095–3110, 2013.
- LORENC, A. C. Analysis methods for numerical weather prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 112, p. 1177–1194, 1986.
- LORENZ, E. N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, Blackwell Publishing Ltd, v. 17, n. 3, p. 321–333, 1965. ISSN 2153-3490. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.2153-3490.1965.tb01424.x>>.
- MEMBERS, S. Forecasting with the Barotropic Model on an Electronic Computer (BESK). *Tellus*, v. 6, n. 2, p. 139–149, 1954.

- MLAWER, E. J. et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, v. 102, n. D14, p. 16663, jul. 1997.
- MORRISON, H.; THOMPSON, G.; TATARSKII, V. Impact of cloud micropysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes. *Monthly Weather Review*, v. 137, p. 991–1007, 2009.
- NCAR. *The Climate Data Guide: Simplistic Overview of Reanalysis Data Assimilation Methods*. 2013. Disponível em: <<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/simplistic-overview-reanalysis-data-assimilation-methods>>.
- NETO, M. A. S. *Mineração Visual De Dados: Extração Do Conhecimento A Partir Das Técnicas De Visualização Da Informação E Mineração De Dados Experimentos: ITAIPU e SIMEPAR*. 2008.
- OFCM. *Doppler Radar Meteorological Observations*. [S.l.], 2005. (Federal meteorological handbook, pt. B).
- OLIVEIRA, C. de. *Identificação e Correção da Banda Brilhante em Dados de Radar Meteorológico*. 2014.
- PARRISH, D. F.; DERBER, J. C. The national meteorological center's spectral statistical-interpolation analysis system. *Monthly Weather Review*, v. 120, p. 1747–1763, 1992.
- PERES, A.; TRISOTTO, F. *Chuva afeta abastecimento de luz em 66 mil domicílios na região de Curitiba*. 2012. Acesso: 2014-07-03. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/vidaecidadania/conteudo.phtml?id=1330184>>.
- RABIER, F. et al. The ecmwf implementation of three-dimensional variational assimilation (3d-var). ii: Structure function. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, v. 124, p. 1809–1830, 1998.
- RICHARDSON, L. *Weather prediction by numerical process*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1922.
- RINEHART, R. *Radar for Meteorologists*. [S.l.]: University of North Dakota, Office of the President, 2004.
- ROBERTS, N. Assessing the spatial and temporal variation in the skill of precipitation forecasts from an NWP model. v. 15, p. 163–169, 2008.
- ROBERTS, N. M.; LEAN, H. W. Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Forecasts of Convective Events. *Monthly Weather Review*, v. 136, n. 1, p. 78–97, jan. 2008. ISSN 0027-0644. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2007MWR2123.1>>.
- SANTOS, R. R. dos et al. Resultados preliminares do sistema de assimilação de dados 3d-var no mbar do inmet. In: *XVII Congresso Brasileiro De Meteorologia*. [S.l.: s.n.], 2012.

- SANTOS, T. N. D. *Redes Neurais Artificiais E Relação Zr Aplicadas À Estimativa De Chuva*. 2014. 1–83 p.
- SARAIVA, E. A. *Determinação da influência do radomo no diagrama de radiação de antena de radar meteorológico*. 2006. 125 p.
- SENKOVSKI, A. *Chuvas deixam 2 mortos e afetam mais de 32 mil pessoas no PR*. 2013. Acesso: 2014-07-03. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/vidaecidadania/conteudo.phtml?id=1384069>>.
- SILVA, G. L. D.; SILVA, A. S. D.; YAMASAKI, Y. Validação da assimilação de dados na inferência da refletividade de um radar com o sistema mm5 gustavo leite da silva, alex santos da silva, yoshihiro yamasaki. *Revista Brasileira de Meteorologia*, n. 1993, p. 75–84, 2012.
- SKAMAROCK, W. C. et al. *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. Boulder, Colorado, USA, June 2008.
- SUGIMOTO, S. et al. An Examination of WRF 3DVAR Radar Data Assimilation on Its Capability in Retrieving Unobserved Variables and Forecasting Precipitation through Observing System Simulation Experiments. *Monthly Weather Review*, v. 137, n. 11, p. 4011–4029, 2009.
- SUN, J.; CROOK, N. A. Dynamical and Microphysical Retrieval from Doppler Radar Observations Using a Cloud Model and Its Adjoint. Part I: Model Development and Simulated Data Experiments. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 54, n. 12, p. 1642–1661, jun. 1997.
- UCAR; DTC. *The weather research and forecast model*. 2013. Disponível em: <<http://www.wrf-model.org/index.php>>.
- VENDRASCO, E. P.; HERDIES, D. L.; ANGELIS, C. F. de. Avaliação do impacto da assimilação de dados de radar na previsão de precipitação a curtíssimo prazo. In: *XVII Congresso Brasileiro De Meteorologia*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–5.
- WANG, H. et al. Indirect assimilation of radar reflectivity with wrf 3d-var and its impact on prediction of four summertime convective events. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 52, n. 4, p. 889–902, 2013.
- WANG, W. et al. *ARW Version 3 Modeling System User's Guide January 2014*. [S.l.]: NCAR, 2014.
- WARNER, T. T. *Numerical Weather and Climate Prediction*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2011. ISBN 9780521513890.
- XIAO, Q. et al. Assimilation of doppler radar observations with a regional 3dvar system: Impact of doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case. *Journal of Applied Meteorology*, v. 44, n. 6, p. 768–788, 2005.
- XIAO, Q. et al. Doppler radar data assimilation in kma's operational forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 89, n. 1, p. 39–43, 2008.